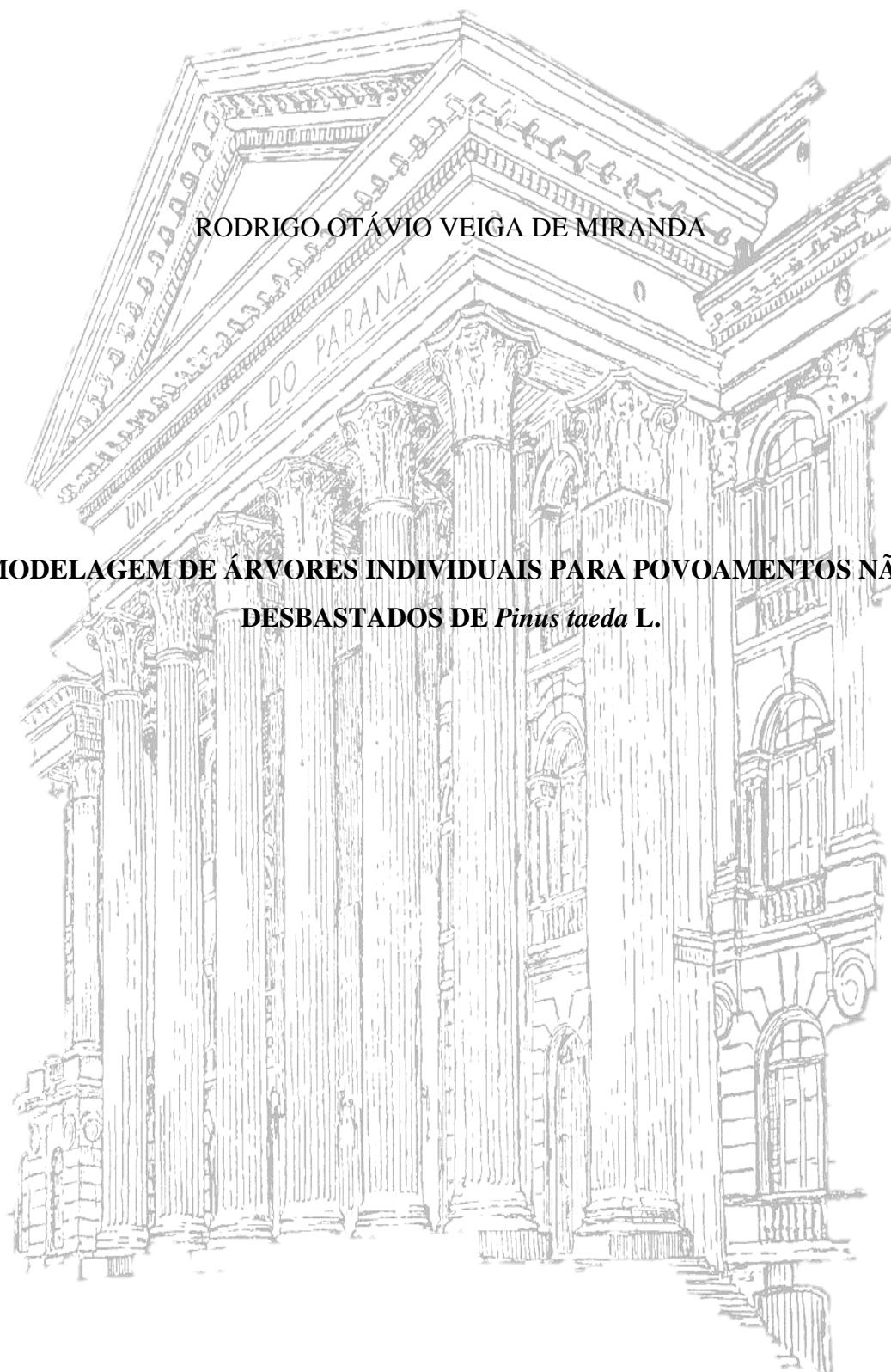


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RODRIGO OTÁVIO VEIGA DE MIRANDA

**MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS NÃO
DESBASTADOS DE *Pinus taeda* L.**



CURITIBA

2016

RODRIGO OTÁVIO VEIGA DE MIRANDA

**MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS NÃO
DESBASTADOS DE *Pinus taeda* L.**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Coorientadores: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado
Prof. Dr. Renato Vinícius Oliveira Castro

CURITIBA

2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Miranda, Rodrigo Otávio Veiga de

Modelagem de árvores individuais para povoamentos não desbastados de
Pinus taeda L. / Rodrigo Otávio Veiga de Miranda. – 2016
168 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Figueiredo Filho

Coorientadores: Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado

Prof. Dr. Renato Vinícius Oliveira Castro

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências
Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa:
Curitiba, 23/03/2016.

Área de concentração: Manejo florestal.

1. Povoamentos florestais – Crescimento – Modelos matemáticos. 2.
Produtividade florestal. 3. Árvores – Medição – Modelos matemáticos. 4. Pinus
taeda. 5. Teses. I. Figueiredo Filho, Afonso. II. Machado, Sebastião do Amaral.
III. Castro, Renato Vinícius Oliveira. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor
de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.52

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **RODRIGO OTÁVIO VEIGA DE MIRANDA**, intitulada: **"MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS NÃO DESBASTADOS DE *Pinus taeda* L."**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 23 de Março de 2016.



Prof AFONSO FIGUEIREDO FILHO (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof ANDREA NOGUEIRA DIAS (UNICENTRO)



Prof CARLOS ROBERTO SANQUETTA (UFPR)



Prof DENISE JETON CARDOSO (EMBRAPA)



Prof FABIANE APARECIDA DE SOUZA RETSLAFF (UNICENTRO)



AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte soberana do conhecimento, por todas as bênçãos alcançadas e por guiar-me e iluminar-me em toda a minha caminhada. À digníssima Mãe, Nossa Senhora, intercedente a seu Filho naquilo que fui incapaz de resolver sozinho.

A Minha Mãe, Alva, pela educação, carinho, força e seu exemplo de caridade e amor;

A minha engenheira florestal e namorada Izabele Soares, pelo carinho, amor, amizade, dedicação e sucessivas revisões deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná, pela oportunidade, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Doutor Afonso Figueiredo Filho, pela orientação e amizade, e pelo exemplo como profissional. Aos Professores Sebastião do Amaral Machado e Renato Vinícius de Oliveira Castro, pela coorientação, amizade e relevantes contribuições neste trabalho.

Ao Professor Doutor Sylvio Péllico Netto, pelo convívio diário e por fazer dos "cafezinhos" aulas optativas de conhecimentos gerais, e aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFPR que, direta ou indiretamente, contribuíram para realização deste trabalho e pelos preciosos ensinamentos.

Aos membros da banca examinadora, pelas excelentes sugestões e contribuições.

À Empresa Florestal Klabin S.A., em nome do Engenheiro Florestal Luiz Gastão Barnett, pelo fornecimento da base de dados e solicitude no esclarecimento de dúvidas.

Aos colegas de laboratório, os quais proporcionaram momentos prazerosos e convívio diário, dentre eles Alan Pelissari, Aurélio Rodrigues, Emanuel Araújo, Fernanda Mendes, Loarena Cruz, Pompeu Guimarães, Rafaella Curto, Rogério Bamberg, Rômulo Môra e Sintia Kohler. E a Ângelo Ebling, Hassan David e Luan Fiorentin, pela amizade e parceria nos trabalhos do dia a dia.

Aos demais colegas do Programa de Pós-Graduação da UFPR, pela amizade e pelas trocas de experiências, dentre eles Alexandre Behling, Ana Fernandes, Antonio Woycikiewicz, Ataídes Marinheski Filho e Jonathan Trautenmüller.

Aos meus familiares e amigos de Paraopeba, pelas horas furtadas de nosso convívio.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente, contribuíram para mais uma conquista e que se alegram com ela.

Muito obrigado.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não
é senão uma gota de água no mar. Mas o mar
seria menor se lhe faltasse uma gota”

Madre Teresa de Calcutá

MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS NÃO DESBASTADOS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi modelar o crescimento e a produção para povoamentos de pinus não desbastados por meio da modelagem de árvore individual independente da distância. Os dados empregados foram provenientes de parcelas permanentes distribuídas em povoamentos de *Pinus taeda* L. localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná. O modelo de Chapman-Richards foi utilizado para determinar as classes de sítio. Para estimativa da altura total, foi utilizado um modelo hipsométrico genérico e, para a estimativa do volume individual, foi usado o modelo de Schumacher e Hall. Para a avaliação da competição, foram utilizados índices de competição independentes da distância. A sobrevivência e a mortalidade do povoamento foram avaliadas por classe de idade, sítio e por classe diamétrica. Fatores relacionados à mortalidade irregular também foram analisados. Modelos de probabilidade de mortalidade por classe de diâmetro foram utilizados para estimar o número de árvores mortas por hectare. Para possibilitar a projeção do crescimento do povoamento, foram utilizados modelos lineares múltiplos de projeção do diâmetro e altura total. O sistema de equações foi aplicado a uma base de dados diferente àquela do ajuste para validação do modelo de árvore individual. Três classes de sítio foram definidas, conforme a variação da altura dominante em relação à idade. Conforme os resultados de testes estatísticos, as curvas de índice de sítio assumiram padrão anamórfico. O modelo hipsométrico selecionado forneceu estimativas precisas, com relação não linear da altura total em função da idade, índice de sítio e diâmetro. O modelo volumétrico proporcionou estimativas satisfatórias em todas as classes de idade consideradas. Não houve um único índice de competição mais correlacionado com todas as variáveis dendrométricas e do povoamento. Para o diâmetro, altura total e probabilidade de mortalidade, os índices de Glover e Hool, Lorimer e Stage foram os mais correlacionados, respectivamente. Os modelos para projetar o diâmetro e altura total propiciaram projeções precisas. O sistema de equações proporcionou resultados estatisticamente iguais às médias observadas, para as três classes de sítio. O modelo proposto foi o primeiro modelo completo de crescimento e de produção de árvores individuais para *P. taeda* no Brasil, e gerou resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Anamorfismo; índice de competição independentes da distância; mortalidade; modelos de projeção; sistema de projeção do crescimento.

INDIVIDUAL-TREE MODELLING FOR UNTHINNED *Pinus taeda* L. STANDS

ABSTRACT

The aim of this study was to model growth and yield for unthinned pinus stands by distance-independent individual-tree modelling. Data were obtained from permanent plots randomly distributed in *Pinus taeda* L. stands, located in the region of Telemaco Borba, State of Parana, Brazil. The Chapman-Richards model was used to determine the site classes. A generic hypsometric model was used to estimate total height, and the Schumacher and Hall model was used to obtain individual-tree volume. The distance-independent competition indices were used to evaluate the competition. The stand survival and mortality were evaluated by age, site and diameter class. Irregular mortality factors were also analyzed. Mortality probability models by diameter class were used to estimate the number of dead trees per hectare. To allow the stand projection, multiple linear projection models of diameter and total height were used. The system of equations was applied to a database different from that one used for their fits for validating the individual-tree model. Three site classes were defined, according to the dominant height variation by age. According to the results of statistical tests, the site index curves assumed an anamorphic pattern. The selected hypsometric model provided accurate and unbiased estimates, with non-linear relationship of total height as a function of the age, site index and diameter. The volumetric model provided satisfactory estimates in all age groups considered. There was not an only index that had the highest correlation values for all correlated variables. For the diameter, total height and mortality probability, the most correlated indices were Glover and Hool, Lorimer, and Stage, respectively. The diameter and total height project models provided accurate projections. The system of equations provided statistically similar results to the average observed data, for the three site classes. The developed model was the first growth and yield forest complete model of individual trees for *P. taeda* in Brazil, and generated satisfactorily results.

Keywords: Anamorphism; distance-independent competition index; mortality; projection models; growth projection system.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO FLORESTAL	27
FIGURA 2	PRINCIPAIS PROCESSOS EM MODELOS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS FLORESTAIS	30

CAPÍTULO I

FIGURA 1.1	VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA IDADE (a) E BOXPLOTS DOS RESÍDUOS PARA AS ESTIMATIVAS DE ALTURA DOMINANTE (b) PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	58
FIGURA 1.2	VALORES OBSERVADOS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA IDADE E CURVAS LIMITES DE ÍNDICE DE SÍTIO, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	60
FIGURA 1.3	RELAÇÃO LINEAR ENTRE O ÍNDICE DE SÍTIO E ALTURA DOMINANTE, EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	62
FIGURA 1.4	BOXPLOTS DOS RESÍDUOS PARA ESTIMATIVA DE ALTURA TOTAL PARA OS MODELOS 8 (a) E 9 (b), PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	66
FIGURA 1.5	DISPERSÃO RESIDUAL PARA ESTIMATIVA DE VOLUME TOTAL COM CASCA PARA AS CLASSES DE IDADE 1 (a), 2 (b) E 3 (c), PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	67

CAPÍTULO II

FIGURA 2.1	BOXPLOTS PARA AS VARIÁVEIS COMPONENTES DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO PARA OS SÍTIOS I, II E III, EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	84
FIGURA 2.2	COMPORTAMENTO MÉDIO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO IC.1 $\left((d_i q^{-1})^2\right)$, IC.2 $(\sum g_i)$, IC.3 $\left((d_i \bar{d}^{-1})^2\right)$ E IC.4 $(h_i \bar{h}^{-1})$ EM FUNÇÃO DA IDADE E SÍTIO, NAS CLASSES DE DIÂMETRO 1 ($d \geq 21,3$ cm) (\square), 2 ($15,8 \leq d \leq 21,2$ cm) ($-$) E 3 ($d < 15,8$ cm) (\circ), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	88
FIGURA 2.3	COMPORTAMENTO MÉDIO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO IC.5 $\left((d_i^2 h_i)(\bar{d}^2 \bar{h})^{-1}\right)$, IC.6 $(\sum d_j d_i^{-1})$, IC.7 $(d_i d_{\max}^{-1})$ E IC.8 $(d_i d_{\text{dom}}^{-1})$ EM FUNÇÃO DA IDADE E SÍTIO, NAS CLASSES DE DIÂMETRO 1 ($d \geq 21,3$ cm) (\square), 2 ($15,8 \leq d \leq 21,2$ cm) ($-$) E 3 ($d < 15,8$ cm) (\circ), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	90

CAPÍTULO III

FIGURA 3.1	NÚMERO DE ÁRVORES VIVAS E MORTAS POR HECTARE E POR IDADE, PARA (a) SÍTIO I, (30,5 m), (b) SÍTIO II (25,5 m) E (c) SÍTIO III (20,5 m), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	105
FIGURA 3.2	DINÂMICA DO NÚMERO DE ÁRVORES SOBREVIVENTES E MORTAS POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, EM QUE (a) 5 ANOS, (b) 10 ANOS, (c) 15 ANOS E (d) 20 ANOS, EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	107
FIGURA 3.3	ÁREA DE OCORRÊNCIA DE MORTALIDADE PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	108

FIGURA 3.4	PERCENTUAL DE ÁRVORES CAÍDAS, ATACADAS POR MACACO-PREGO E DERRUBADAS POR AÇÃO DE VENTOS (a) E DESVIO PADRÃO DO PERCENTUAL DE ÁRVORES ATACADAS POR MACACO-PREGO (b), PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	109
FIGURA 3.5	DISPERSÃO RESIDUAL PARA A ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ÁRVORES MORTAS POR HECTARE EM FUNÇÃO DA IDADE, PARA O MODELO EXPONENCIAL (a) E DE BUCHMAN (b), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	112
FIGURA 3.6	VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS DO NÚMERO DE ÁRVORES MORTAS POR HECTARE, PARA O MODELO EXPONENCIAL E DE BUCHMAN, PARA O (a) SÍTIO I (30,5 m), (b) SÍTIO II (25,5 m) E (c) SÍTIO III (20,5 m), PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	113

CAPÍTULO IV

FIGURA 4.1	BOXPLOTS DOS RESÍDUOS POR CLASSE DE DIÂMETRO ATUAL PARA O MODELO 1 COM ÍNDICE DE COMPETIÇÃO IC.3 PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	133
FIGURA 4.2	BOXPLOTS DOS RESÍDUOS POR CLASSE DE ALTURA TOTAL ATUAL PARA O MODELO 1, COM ÍNDICE DE COMPETIÇÃO IC.6, PARA PROJEÇÃO DA ALTURA TOTAL EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	136
FIGURA 4.3	BOXPLOTS DOS RESÍDUOS POR CLASSE DE DIÂMETRO ATUAL DOS MODELOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO (a) E POR CLASSE DE ALTURA TOTAL ATUAL DOS MODELOS PARA PROJEÇÃO DA ALTURA TOTAL (b), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	137

CAPÍTULO V

FIGURA 5.1	FLUXOGRAMA DOS PRINCIPAIS PROCESSOS EMPREGADOS NA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	151
FIGURA 5.2	NÚMERO DE ÁRVORES MORTAS POR HECTARE OBSERVADO E ESTIMADO, PARA AS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), RESPECTIVAMENTE, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	154
FIGURA 5.3	DIÂMETROS OBSERVADOS E PROJETADOS EM DIFERENTES IDADES PARA AS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	156
FIGURA 5.4	ALTURAS TOTAIS OBSERVADAS E PROJETADAS EM DIFERENTES IDADES PARA AS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	157
FIGURA 5.5	VOLUMES OBSERVADOS E ESTIMADOS EM DIFERENTES IDADES E NAS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ	158
FIGURA 5.6	VOLUMES OBSERVADOS E ESTIMADOS (CORRIGIDOS) EM DIFERENTES IDADES E NAS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	160

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

TABELA 1.1	PARCELAS E/OU ÁRVORES UTILIZADAS EM CADA UMA DAS ETAPAS DA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	52
TABELA 1.2	MODELOS GENÉRICOS DE RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA PARA ESTIMAR ALTURA TOTAL DE POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	54
TABELA 1.3	NÚMERO DE ÁRVORES CUBADAS POR CLASSES DE IDADE, DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	56
TABELA 1.4	LIMITES DE ALTURA DOMINANTE POR IDADE E CLASSE DE SÍTIOS I, II E III, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	60
TABELA 1.5	COEFICIENTES ESTIMADOS E SEUS RESPECTIVOS P-VALORES DA RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE SÍTIO E A ALTURA DOMINANTE MÉDIA, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	61
TABELA 1.6	COEFICIENTES DE VARIAÇÃO EM ALTURA DOMINANTE POR IDADE E CLASSE DE SÍTIO, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	62
TABELA 1.7	DISTRIBUIÇÃO DAS PARCELAS POR CLASSE DE SÍTIO E POR NÚMERO DE MEDIÇÕES, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	63
TABELA 1.8	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS, POR CLASSE DE SÍTIO E IDADE, PARA AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E DO POVOAMENTO DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	64

TABELA 1.9	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR ALTURA TOTAL EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	65
------------	---	----

TABELA 1.10	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO UTILIZADO PARA ESTIMAR VOLUME TOTAL COM CASCA PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> , SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	66
-------------	--	----

CAPÍTULO II

TABELA 2.1	ÍNDICES DE COMPETIÇÃO INDEPENDENTES DA DISTÂNCIA AVALIADOS PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DE POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	79
------------	---	----

TABELA 2.2	MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E DO POVOAMENTO COM OS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO AVALIADOS, POR CLASSE DE SÍTIO, EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> DA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	86
------------	--	----

CAPÍTULO III

TABELA 3.1	MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR A PROBABILIDADE DE MORTALIDADE EM POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	102
------------	---	-----

TABELA 3.2	COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PROBABILIDADE DE MORTALIDADE, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	111
------------	---	-----

CAPÍTULO IV

TABELA 4.1	AMPLITUDE DAS VARIÁVEIS EMPREGADAS NO AJUSTE E VALIDAÇÃO DOS MODELOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	125
TABELA 4.2	MODELOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	129
TABELA 4.3	COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS TESTADOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	130
TABELA 4.4	RESULTADOS DOS AJUSTES DOS MODELOS EMPREGADOS PARA PROJETAR A ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	134
TABELA 4.5	ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO E PRECISÃO DOS MODELOS PARA PROJETAR DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	136

CAPÍTULO V

TABELA 5.1	NÚMERO DE PARCELAS PARA O AJUSTE E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO PARA POVOAMENTOS DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	149
TABELA 5.2	ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA OS DADOS SELECIONADOS PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS, POR CLASSE DE SÍTIO E IDADE, PARA AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E DO POVOAMENTO DE <i>P. taeda</i> SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ	150

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	19
2 OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3 ESTRUTURA DA TESE	22
4 REVISÃO DE LITERATURA	23
4.1 O PINUS NA REGIÃO SUL DO BRASIL	23
4.2 TIPOS GERAIS DE MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO	24
4.3 MODELOS DE ÁRVORES INDIVIDUAIS	28
4.4 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO	33
4.5 MORTALIDADE	36
4.6 MODELOS DE INCREMENTO NA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS	38
REFERÊNCIAS	40

CAPÍTULO I

DEFINIÇÃO DE CLASSES DE SÍTIO, RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA E VOLUMÉTRICA PARA POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO	47
ABSTRACT	48
1 INTRODUÇÃO	49
2 MATERIAL E MÉTODOS	51
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA	51
2.2 ORIGEM E DETALHAMENTO DOS DADOS	51
2.3 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE SÍTIO	52
2.4 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	54
2.5 RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA	54
2.6 ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS	55
2.7 AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DOS MODELOS	57
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
3.1 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE SÍTIO	58

3.2 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS	63
3.3 RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA	65
3.4 ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS	66
4 CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS	69

CAPÍTULO II

ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO	73
ABSTRACT	74
1 INTRODUÇÃO	75
2 MATERIAL E MÉTODOS	78
2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS	78
2.2 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO	78
2.3 AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO	80
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
3.1 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO	83
4 CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS	93

CAPÍTULO III

MORTALIDADE EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO	97
ABSTRACT	98
1 INTRODUÇÃO	99
2 MATERIAL E MÉTODOS	101
2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS	101
2.2 ANÁLISE DA MORTALIDADE DO POVOAMENTO	101
2.3 ANÁLISE QUALITATIVA DO POVOAMENTO	101
2.4 MODELOS DE MORTALIDADE	102
2.5 AVALIAÇÃO DOS MODELOS	104
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	105
3.1 ANÁLISE DA MORTALIDADE DO POVOAMENTO	105

3.2 ANÁLISE QUALITATIVA DO POVOAMENTO	108
3.3 MODELOS DE MORTALIDADE	110
4 CONCLUSÕES	115
REFERÊNCIAS	116

CAPÍTULO IV

MODELOS DE PROJEÇÃO EM DIÂMETRO E ALTURA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO	120
ABSTRACT	121
1 INTRODUÇÃO	122
2 MATERIAL E MÉTODOS	124
2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS	124
2.2 BASE DE DADOS PARA O AJUSTE DOS MODELOS DE DIÂMETRO E ALTURA	124
2.3 MODELOS DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL	125
2.4 AVALIAÇÃO DOS MODELOS	127
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	129
3.1 MODELOS DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL	129
4 CONCLUSÕES	139
REFERÊNCIAS	140

CAPÍTULO V

PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L. COM MODELOS DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

RESUMO	144
ABSTRACT	145
1 INTRODUÇÃO	146
2 MATERIAL E MÉTODOS	148
2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS	148
2.2 ESTIMATIVA DA MORTALIDADE	152
2.3 PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL	152
2.4 ESTIMATIVA DO VOLUME	153

2.5 AVALIAÇÃO DAS PROJEÇÕES	153
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	154
3.1 ESTIMATIVA DA MORTALIDADE	154
3.2 PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL	155
3.3 ESTIMATIVA DO VOLUME	158
4 CONCLUSÕES	162
REFERÊNCIAS	163
5 CONCLUSÕES GERAIS	167
6 RECOMENDAÇÕES	168

1 INTRODUÇÃO GERAL

O plantio de espécies de rápido crescimento para fins comerciais é uma atividade muito importante no Brasil, do ponto de vista econômico, social e ambiental. Dentre essas espécies, destacam-se as do gênero *Pinus* sp., plantadas, na sua maioria, no Sul do Brasil, especialmente no estado do Paraná.

As empresas florestais brasileiras buscam suprir a demanda por madeira de diferentes segmentos do setor florestal. Assim, elas investem em melhorias em todo o processo produtivo, desde a seleção do material genético até a colheita, objetivando, principalmente, o aumento e manutenção da produtividade e uma produção de forma sustentável. Além disso, buscam novas tecnologias para obter matéria-prima de alta qualidade visando atender tanto segmentos produtivos tradicionais quanto novos, que utilizarão a madeira como insumo.

Independentemente do segmento florestal, é primordial e de interesse de qualquer administrador florestal conseguir quantificar e prognosticar, com confiabilidade, o estoque de seus povoamentos. A quantificação do crescimento e da produção consiste em uma condição essencial para definir a utilização dos bens advindos do povoamento, além de fornecer informações que subsidiam a tomada de decisões para a maioria das atividades setoriais.

Os modelos mais empregados para prognosticar o crescimento e a produção em povoamentos florestais podem ser distribuídos em três categorias: modelos em nível de povoamento ou globais; modelos em classes de diâmetros; e modelos de árvores individuais. No Brasil, predomina o emprego da primeira categoria, cujas estimativas do número de árvores, área basal e volume são obtidas por unidade de área, a partir da idade, índice de sítio e uma medida de densidade do povoamento. Sua grande utilização é justificada pelo maior percentual de plantios destinados a suprir a demanda dos setores de celulose, papel e carvão vegetal, cuja informação por unidade de área é suficiente para subsidiar o planejamento dessas empresas.

Nos modelos em classes diamétricas, o número de árvores por hectare por classe de diâmetro é projetado para uma idade de interesse. A principal finalidade desses modelos, além da obtenção de estimativas por classe diamétrica, é obter a produção de madeira para multiprodutos, a partir da definição de classes de sortimentos.

A última categoria, que diz respeito aos modelos de árvores individuais, fornece informações mais detalhadas, cujos resultados são obtidos individualmente para cada árvore. O número de árvores, área basal e volume podem ser obtidos por classe de diâmetro, a partir da soma das estimativas individuais das árvores contidas na classe. Em termos gerais, e considerando povoamentos florestais, esses modelos são compostos por três submodelos, sendo

um para estimar o incremento em diâmetro; outro para avaliar o incremento em altura; uma função de mortalidade ou sobrevivência; além de um índice que expresse a competição. Diante disso, requerem maior controle nas medições e obtenção das informações, para que seja possível o cálculo dos incrementos individuais e mortalidade.

De acordo com o índice de competição empregado, os modelos de árvores individuais podem ser classificados como dependentes, independentes e semi-independentes da distância. A diferença básica entre esses índices está em considerar ou não a distância das árvores no povoamento, a partir de um mapeamento pré-estabelecido ou medições no campo. Esses modelos são capazes de fornecer estimativas que atendam ao planejamento para qualquer segmento florestal, desde setores que utilizam a madeira em menores dimensões, visando a produção de papel, celulose e carvão vegetal, quanto para a produção de madeira de maiores tamanhos, objetivando produzir madeira para serraria e laminação, por exemplo. A madeira de pinus é produzida, dentre outros fins, para a obtenção de toras de grandes dimensões.

A exigência para a aplicação de modelos em nível de árvores individuais está estritamente relacionada ao controle mais efetivo no momento das medições e remediações. Em algumas circunstâncias, a não utilização desses modelos dá-se pelo fato de demandarem processamentos adicionais ou devido apenas por questões culturais. Porém, com a disseminação das técnicas e do conhecimento, atrelada ao avanço de ferramentas computacionais, há justificativas aceitáveis para empregá-los.

Essa categoria de modelos de crescimento e produção foi proposta na década de 1960, sendo empregada há alguns anos nos Estados Unidos e Europa. No Brasil, a maior parte dos trabalhos se restringe ao emprego de um de seus submodelos, sendo escassos aqueles que empregam a modelagem de árvores individuais em sua totalidade. Mais recentemente, são encontrados trabalhos publicados empregando-se essa categoria de modelo para povoamentos, em especial para eucalipto. Para o pinus, até o momento, não foram publicados trabalhos em que foi aplicada a modelagem em árvores individuais de forma integral. Diante disso, verifica-se a importância em estudar o crescimento e a produção para povoamentos de pinus a partir de modelos de árvores individuais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Modelar o crescimento e a produção para povoamentos de *Pinus taeda* L. não desbastados por meio da modelagem em nível de árvore individual independente da distância.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir as classes de sítio, assim como as equações para estimar a altura total e o volume total com casca por árvore;
- Avaliar a competição a partir de índices de competição independentes da distância;
- Desenvolver uma função de probabilidade de mortalidade por classe diamétrica;
- Ajustar funções para projeção do diâmetro e altura total de árvores individuais;
- Validar o modelo de árvore individual independente da distância.

3 ESTRUTURA DA TESE

Para atingir os objetivos, a tese foi estruturada da seguinte maneira:

Parte inicial – Introdução geral, objetivos e revisão de literatura;

Capítulo I – Definição de classes de sítio, relação hipsométrica e volumétrica para povoamentos de *Pinus taeda* L.;

Capítulo II – Índices de competição para árvores individuais de *Pinus taeda* L.;

Capítulo III – Mortalidade em povoamentos de *Pinus taeda* L.;

Capítulo IV – Modelos de projeção em diâmetro e altura para árvores individuais de *Pinus taeda* L.; e

Capítulo V – Projeção da produção de *Pinus taeda* L. com modelos de árvores individuais.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 O PINUS NA REGIÃO SUL DO BRASIL

A partir da criação do Código Florestal Brasileiro em 1965, foram tomadas as primeiras medidas governamentais de estímulo ao plantio de florestas, com destaque ao PIFFR – Programa de Incentivos Fiscais ao Florestamento e Reflorestamento (BACHA, 2008), sobretudo com os gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus*. Na região sul do Brasil, áreas foram ocupadas principalmente com as espécies *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* var. *elliottii* (SHIMIZU, 1997) devido, sobretudo, à boa adaptabilidade das espécies na região.

A principal finalidade da produção madeireira dessas florestas era abastecer o setor de celulose e papel. Todavia, com as reservas de florestas naturais se esgotando ou sendo incluídas em áreas de preservação ambiental, a demanda por toras ou madeira de pinus aumentou, tanto para a produção de madeira serrada quanto para a fabricação de lâminas (OLIVEIRA, 1995). A maturação desses reflorestamentos de pinus no Brasil proporcionou um aumento substancial na oferta de madeira no país (TUOTO et al., 2004).

No Sul do Brasil, o *P. taeda* é uma das espécies mais plantadas (SBS, 2006). Ela apresenta rápido crescimento e alta produtividade nessa região, mesmo sem o uso de insumos. As condições de adaptação do pinus aos solos ligeiramente ácidos, que compõem a maioria dos solos do país, permitiram a implantação de extensas áreas que, juntamente com a adoção de práticas silviculturais adequadas, tornam as espécies do gênero *Pinus* importantes fontes de matéria-prima, proveniente de plantios estabelecidos dentro de padrões de sustentabilidade (KRONKA; BERTOLANI; PONCE, 2005).

A madeira de pinus é responsável pela produção de diversos produtos. Dentre esses, tem-se a celulose de fibra longa não branqueada, pasta mecânica, molduras, painéis de madeira reconstituída, lâmina, madeira serrada bruta e beneficiada, madeira bruta seca em estufa, móveis e pré-cortado para móveis, laterais de gavetas, palito de fósforo, lâmina de caixa de fósforos, grampo, prendedor de roupa, pazinha, cavaco, cerca, “pallet”, compensado anatômico, sarrafo, refilado, caixa de brinquedo, tora, torete, lenha, porta, assoalho, meia-cana, prancha, tábuas, forro, rodapé, tapete de sarrafo, papel e celulose, estrado, embalagem, embalagem pré-cortada e aplainada, ripão (SCHUCHOVSKI, 2003).

O plantio de árvores no Brasil é uma atividade econômica importante com impacto significativo no campo social. Atualmente, os plantios de pinus no país atingem uma

produtividade média de $31 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}.\text{ano}$, e ocupam 1,59 milhão de hectares, sendo que, desse total, 42,4% concentram-se no estado do Paraná (IBÁ, 2015).

Devido à diversidade de produtos que podem ser obtidos com a madeira do pinus, sobretudo aqueles que demandam toras de maiores dimensões, os povoamentos são manejados com desbaste, comumente dois, sendo o primeiro na idade de 8 a 12 anos e o segundo de 14 a 18 anos, com corte raso próximo aos 25 anos. Porém, atualmente, alguns desses plantios estão sendo manejados com rotações relativamente curtas, de 15 a 20 anos, sem desbaste. Conforme Dobner Jr. et al. (2012), o objetivo da maioria desses plantios é produzir biomassa e toras de pequenas e médias dimensões. Os ciclos produtivos curtos estão relacionados a decisões silviculturais que, por sua vez, são cada vez mais baseadas em indicadores financeiros.

A opção por regimes silviculturais sem desbaste e poda é motivada pela maximização do volume por hectare e, especialmente, da análise do investimento florestal de forma integrada com a indústria em empresas verticalizadas. Devido a isso, prevê-se uma oferta reduzida de toras grossas ($> 35 \text{ cm}$) num futuro próximo (MANCINI, 2011).

4.2 TIPOS GERAIS DE MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO

Um dos passos mais importantes na elaboração de modelos de produção é a seleção de funções para a modelagem do crescimento e produção das árvores e povoamentos (FREIRE, 2002). A área florestal possui longa tradição no emprego de métodos quantitativos e da modelagem. Principalmente nas áreas de inventário, manejo e crescimento florestal, modelos são úteis para realizar a prognose e extrapolação com base em dados observados no campo. Nas ciências florestais, como em todos os ramos dentro das ciências naturais e exatas, a modelagem, a análise de sistemas e a prognose hoje são indispensáveis (SPATHELF; NUTTO, 2000).

A prognose da vegetação florestal pode ser realizada a partir de métodos qualitativos e quantitativos. Modelos qualitativos representam as primeiras tentativas para modelar sucessão florestal, a partir de um diagrama e uma descrição textual dos mecanismos de influência (YEMSHANOV; PERERA, 2003; TAYLOR; CHEN; VANDAMME, 2009). Métodos quantitativos englobam os modelos de paisagem e os de florestas e povoamentos, em que esses últimos abrangem a maior parte das categorias dos modelos aplicados no setor florestal (TAYLOR; CHEN; VANDAMME, 2009; WEISKITTEL et al., 2011).

Os modelos empregados em florestas e povoamentos estão distribuídos em quatro grandes categorias: modelos estatísticos, de processos, híbridos e modelos de abertura de

dossel. Dentro de qualquer categoria, modelos diferem em sua resolução espacial e temporal, dependência espacial e o grau de determinismo (WEISKITTEL et al., 2011).

Resolução espacial refere-se à unidade básica para predições, sendo a mais simples quando são empregados dados em nível de povoamento, em classes de tamanho, e em uma abordagem mais detalhada, quando se considera a árvore individual. Resolução temporal se refere ao intervalo de tempo utilizado para as projeções do modelo. Modelos também variam conforme a dependência espacial. Modelos dependentes da distância ou espacialmente explícitos requerem informações de localização espacial em que, muitas vezes, coordenadas x-y de árvores individuais são necessárias. Modelos independente da distância ou espacialmente implícitos não exigem essa informação (WEISKITTEL et al., 2011). Esses autores afirmam que os modelos podem ser ainda determinísticos ou estocásticos. Enquanto modelos determinísticos sempre retornam o mesmo resultado para as mesmas condições iniciais, modelos estocásticos incorporam algum elemento puramente aleatório, e tentam simular a variação natural que ocorre no mundo real, fornecendo diferentes valores preditos mesmo para as mesmas condições iniciais.

Os modelos estatísticos contam com a coleta e análise dos dados que irão caracterizar a população objeto, de modo a permitir que a variabilidade estatística seja estimada pelos parâmetros, sendo seu principal objetivo a predição do crescimento florestal ao longo do tempo. Esses modelos empregam dados empíricos e técnicas estatísticas como regressão para obter relações quantitativas. São mais robustos, com longa história de desenvolvimento, cujos dados necessários para a modelagem são facilmente disponíveis, e representam excelentes ferramentas para comparar tratamentos silviculturais. Como desvantagens, requerem dados empíricos de alta qualidade, podem apresentar resultados inesperados fora dos limites de abrangência das variáveis e, geralmente, são insensíveis às alterações climáticas (TAYLOR; CHEN; VANDAMME, 2009; WEISKITTEL et al., 2011).

Modelos de processos ajustam os processos de crescimento, tendo como entrada a luz, temperatura e níveis de nutrientes do solo, como também a modelagem da fotossíntese, respiração e alocação de fotossintetizados às raízes, caules e folhas (MÄKELÄ et al., 2000). Além disso, esses modelos são conhecidos como mecanísticos ou modelos fisiológicos. Ajudam a fornecer uma melhor compreensão do crescimento e dinâmica do povoamento, porém, ainda não foram usados com sucesso para prever produções de madeira para o manejo florestal (VANCLAY, 1994).

Modelos híbridos mesclam características de modelos estatísticos e de processo, sendo utilizados tanto para a compreensão como para a predição (WEISKITTEL et al., 2011). Uma

maneira de mesclar a modelagem processual com a modelagem estatística é inserir dados climáticos como covariáveis dentro de modelos biométricos tradicionais (SNOWDON et al., 1998). Outra opção para mesclar os dois métodos de modelagem é usar a primeira para prever o crescimento em biomassa e a segunda para traduzir a resposta de biomassa para algo mais prático para o manejador florestal, como volume ou número de árvores por hectare (LANDSBERG, 2003). Representam modelos robustos, mas com sensibilidade às mudanças climáticas. Ainda, os modelos híbridos minimizam o número de parâmetros necessários na modelagem, a qual pode ser realizada a partir de dados de inventário florestal tradicional (MONSERUD, 2003).

Modelos de abertura do dossel, ou modelos de clareiras, são projetados para explorar processos ecológicos a longo prazo, geralmente para o entendimento das interações que controlam a sucessão de espécies florestais. Dependem fortemente de teoria ecológica e interpretação da dinâmica de espécies em relação às condições ambientais e de competição (BUGMANN, 2001; WEISKITTEL et al., 2011). Lidam com nascimento ou recrutamento, crescimento e mortalidade, sendo usados para simular a composição de espécies e comportamento com o passar do tempo, em resposta às condições ambientais alteradas e para fornecer informações qualitativas das florestas (HIGUCHI et al., 2008).

Independentemente da categoria do modelo de crescimento, esses representam um resumo de observações e/ou fenômenos biológicos. Aplicados nas condições sob as quais foram coletados os dados, os modelos são imprescindíveis na prognose dos futuros recursos florestais, na escolha de alternativas silviculturais e no apoio à tomada de decisões no manejo e na política florestal (SPATHELF; NUTTO, 2000). Na Figura 1 está apresentada uma síntese dos modelos empregados para predição da vegetação florestal.

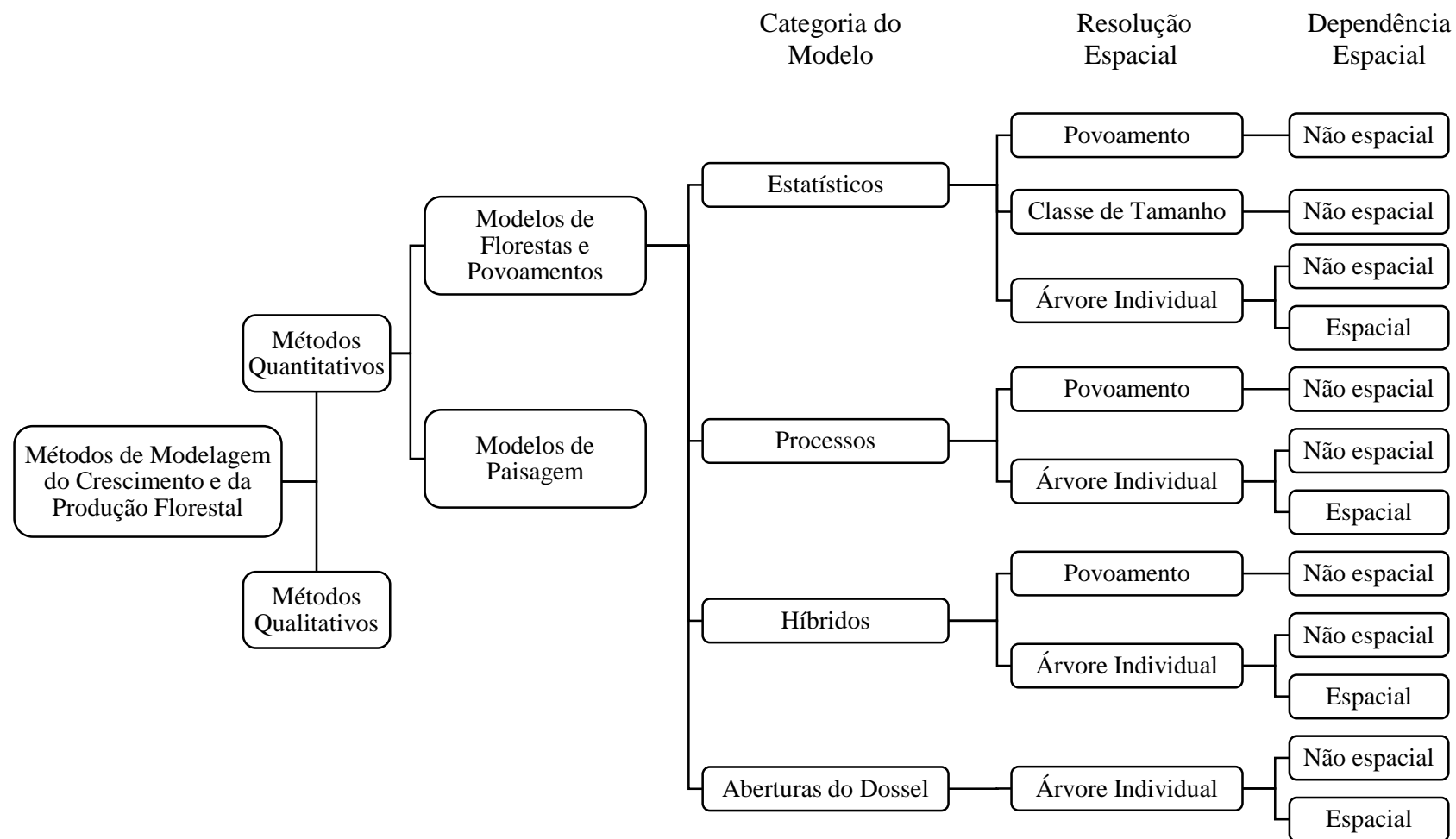


FIGURA 1 - CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO FLORESTAL
 FONTE: Adaptado de TAYLOR; CHEN; VANDAMME (2009) e WEISKITTEL et al. (2011).

Munro (1974), após pesquisas realizadas em trabalhos publicados, sugeriu as bases para uma classificação de modelos em duas categorias, sendo os de povoamento e os de árvore individual, com relação à unidade primária de simulação que é, respectivamente, o povoamento e a árvore.

Posteriormente, outras classificações foram propostas, sendo extensões ou modificações da classificação básica de Munro, em que a mais importante é a distinção, como uma classe independente, a dos modelos de povoamento que incluem distribuições de diâmetros (BAILEY, 1980; BURKHART; CAO; WARE, 1981). Como exemplo, Davis e Johnson (1987) classificaram os modelos de crescimento e produção em modelos de povoamento, por classes de diâmetro e de árvores individuais.

4.3 MODELOS DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Os modelos de árvores individuais simulam cada indivíduo com relação ao estabelecimento, crescimento e mortalidade (VANCLAY, 1994). Eles simulam o crescimento individual em diâmetro, altura e copa, por árvore, decidindo se a árvore vive ou morre, calculando seu crescimento e volume (DAVIS; JOHNSON, 1987). Nessa categoria de modelo, a árvore individual representa a unidade básica na modelagem do crescimento do povoamento (AVERY; BURKHART, 1994). Dessa forma, essa categoria oferece vantagens em comparação com outras abordagens, pois é flexível, caracteriza de forma precisa o crescimento sob uma variedade de condições do povoamento e fornece resultados detalhados (WEISKITTEL et al., 2011) como, por exemplo, informações sobre a estrutura e dinâmica do povoamento, incluindo a distribuição de volume por classe de tamanho (CLUTTER et al., 1983).

Modelos de árvores individuais representam um nível muito mais elevado de resolução em termos de abstração do sistema e modelagem em relação aos modelos de povoamento (NEWNHAM, 1964; EK; MONSERUD, 1974; PRETZSCH; BIBER; DURSKY, 2002). Os resultados para o povoamento são obtidos pela agregação dos resultados de árvores individuais (PUKKALA, 1987; VANCLAY, 1994).

Modelos baseados em árvores individuais são mais eficazes em caracterizar os impactos de diversos tipos de agentes nocivos e respostas do povoamento a práticas de manejo, particularmente desbaste e poda, comparado aos métodos de modelagem em nível de povoamento, porque a influência desses tipos de eventos geralmente varia dentro do plantio. As principais desvantagens dos modelos de árvores individuais estão

relacionadas com o alto custo para desenvolvê-los; dados mais detalhados são necessários para a sua utilização; e erros provenientes da manipulação dos dados são potencialmente maiores. Além disso, alguns desses modelos requerem uma capacidade computacional relevante e maior tempo de atualização da base de dados, sobretudo para inventários florestais de grande porte (WEISKITTEL et al., 2011).

Daniels, Burkhardt e Clason (1986) também relataram que essa categoria de modelos é mais complexa e de difícil construção quando comparada aos modelos em nível de povoamento ou por classe de diâmetro, pois são constituídos por vários submodelos que estimam o crescimento em diâmetro, crescimento em altura, crescimento em volume e competição entre as árvores. Ainda, muitos modelos apresentam variáveis de difícil medição, como variáveis relacionadas às medições das copas das árvores.

Munro (1974) classificou os modelos de árvore individual em independentes e dependentes da distância, conforme a medida de competição que incorporam. Os primeiros empregam funções de variáveis do povoamento e da dimensão inicial da árvore, enquanto que os modelos dependentes incorporam, de algum modo, o número, dimensões e distâncias de determinado número de árvores vizinhas. Uma terceira categoria são os modelos semi-independentes, os quais empregam o índice semi-independente proposto por Stage e Ledermann (2008), desenvolvido para parcelas circulares, sendo espacialmente restritos às árvores mais próximas da árvore-objeto, contrariamente à totalidade das árvores da unidade amostral (LEDERMANN, 2010; CONTRERAS; AFFLECK; CHUNG, 2011).

Modelos de árvores independentes da distância (algumas vezes denominados de "posição independente", "de localização independente", ou "não espacialmente explícitos") geralmente projetam o crescimento da árvore em função de sua dimensão atual e de variáveis em nível de povoamento, como idade, índice de sítio e densidade. A localização das árvores não é especificada na aplicação desses modelos (BURKHART; TOMÉ, 2012), pois assumem um padrão espacial médio das árvores encontradas no povoamento selecionado para a construção do modelo (WEISKITTEL et al., 2011).

Tipicamente, modelos independentes da distância consistem em três componentes básicos: uma equação de crescimento em diâmetro, uma equação de crescimento em altura (ou uma relação de altura-diâmetro para estimar alturas a partir de valores de diâmetro), e um componente de mortalidade. A mortalidade pode ser obtida estocasticamente ou ser predita como uma função da taxa de crescimento e/ou características de árvores (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Outro componente diz respeito ao recrutamento (HASENAUER, 2000). Contudo, para povoamentos homogêneos e equiâneos, normalmente esse componente é desconsiderado, uma vez que, em geral, na ocasião do primeiro inventário todas as árvores atingiram o diâmetro mínimo de medição. Na Figura 2 é apresentado um esquema dos principais processos de um modelo de crescimento de árvore individual empregado em povoamentos florestais. Normalmente, para cada árvore dispõe-se da informação relativa ao seu diâmetro à altura do peito, altura total e, algumas vezes, da proporção ou diâmetro da copa. Todas essas informações são utilizadas ao nível da árvore individual na simulação do crescimento, caracterizando as árvores em termos de diversos parâmetros de dimensão e forma, os quais são projetados ao longo do tempo (CLUTTER et al., 1983).

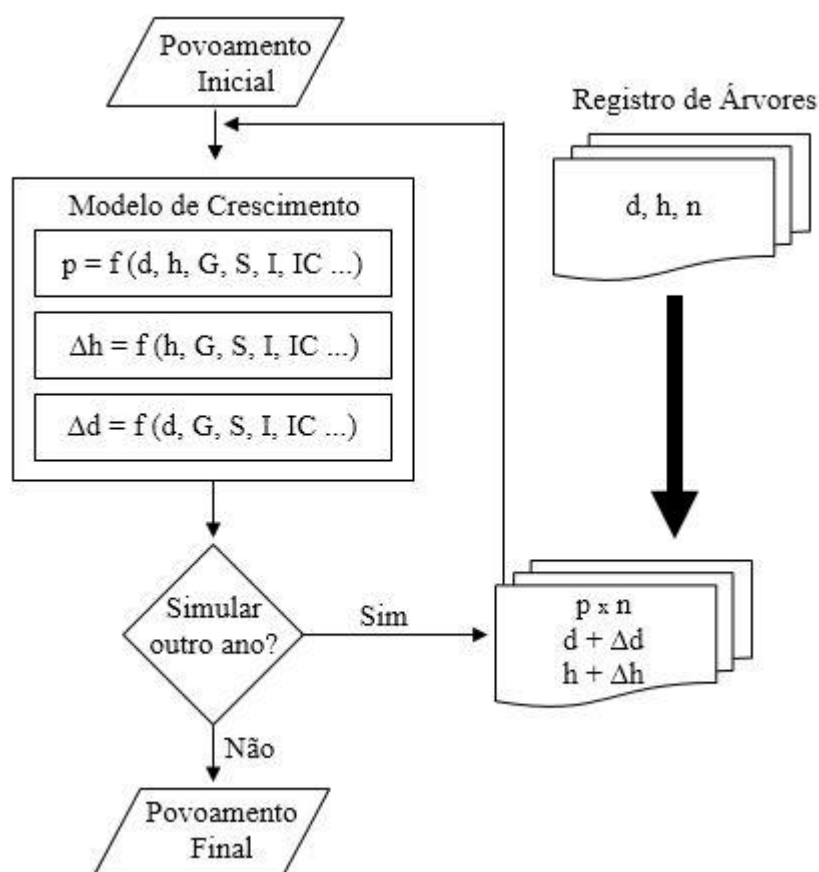


FIGURA 2 - PRINCIPAIS PROCESSOS EM MODELOS DE CRESCIMENTO DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS FLORESTAIS. EM QUE: Δd = INCREMENTO EM DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO; Δh = INCREMENTO EM ALTURA; p = PROBABILIDADE DE SOBREVIVÊNCIA OU MORTALIDADE; d = DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO; h = ALTURA DA ÁRVORE; G = ÁREA BASAL POR HECTARE; S = ÍNDICE DE SÍTIO; I = IDADE DA ÁRVORE; IC = ÍNDICE DE COMPETIÇÃO; n = NÚMERO DE ÁRVORES
 FONTE: Adaptado de WEISKITTEL et al. (2011).

Nos modelos dependentes da distância (também designados de "posição dependente", "de localização dependente", ou "espacialmente explícitos"), as condições iniciais do povoamento são inseridas ou geradas, e para cada árvore é atribuída sua coordenada. O crescimento por árvore é simulado em função de seus atributos, da qualidade do sítio e por uma medida de competição das árvores vizinhas. O índice de competição varia de modelo para modelo, porém, em geral, é função do tamanho da árvore-objeto e do tamanho e distância das competidoras (BURKHART; TOMÉ, 2012). Para Vanclay (1994), o termo "espacialmente" é preferível, pois podem exigir dados espaciais tridimensionais, e não apenas a distância da árvore objeto em relação aos seus vizinhos.

Newnham (1964) foi o primeiro a desenvolver um simulador de povoamento dependente da distância baseado no crescimento de árvores individuais (PRETZSCH, 2009). Desde o trabalho de Newnham, vários modelos de árvores individuais dependentes de distância foram propostos para povoamentos equiâneos e homogêneos, incluindo simuladores desenvolvidos pela Arney (1974) e Mitchell (1975) para Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*); Hegyi (1974) para *Pinus banksiana*, Burkhart et al. (1987) para *P. taeda* e Pukkala (1989) para *Pinus sylvestris* (BURKHART; TOMÉ, 2012).

A bibliografia compilada por Dudek e Ek (1980) reviu modelos de árvores individuais de todo o mundo, identificando mais de 40 modelos diferentes de árvores individuais divididos, mais ou menos uniformemente, em modelos dependentes e independentes da distância (PRETZSCH, 2009). Pesquisas realizadas por Lorimer (1983), Daniels, Burkhart e Clason (1986), Biging e Dobbertin (1995) e Fox et al. (2007) revelaram que a consideração da distância não propiciou ganho em precisão, indicando inexistência de superioridade dos modelos dependentes da distância.

A modelagem do crescimento de árvores individuais vem sendo desenvolvida em especial em países europeus e norte-americanos (CHASSOT et al., 2011). No Brasil, a maior parte dos trabalhos empregaram apenas os submodelos componentes dos modelos de árvores individuais, salientando-se, nesse aspecto, trabalhos realizados para algumas espécies nativas da Amazônia (SILVA et al., 2002; PHILLIPS et al., 2004); canjerana (*Cabralea canjerana* (Well.) Mart.) (DURLO, 2001); cedro (*Cedrela fissilis* Vellozo) (DURLO et al., 2004); canela preta (*Nectandra megapota mica* (Spreng.) Mez.) (DELLA FLORA et al., 2004); clones de eucalipto (MENDES et al., 2006); eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden) (NUTTO et al., 2006) (MARTINS, 2011); bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) (WEBER, 2007); e araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.)

(CURTO, 2015). Na sequência, são observados alguns trabalhos recentes em que foi realizada a modelagem do crescimento e da produção, empregando-se a modelagem de árvores individuais.

Alegria (2004) utilizou a modelagem de árvores individuais para povoamentos puros de pinheiro bravo (*P. pinaster* Aiton), de estrutura irregular e originados de regeneração natural, na região de Castelo Branco, Portugal. A dinâmica do crescimento e produção baseou-se em submodelos de crescimento anual em diâmetro com casca, altura total e altura dominante, sítio, idade, proporção média da copa, lista futura de árvores, volume total e comercial por árvore. A aplicação desses submodelos deu origem ao modelo PBIRROL.

Salles (2010) realizou a modelagem do crescimento e produção para clones de eucalipto de 20 a 95 meses de idade, provenientes de um sistema agroflorestal, situado no município de Paracatu, região noroeste do estado de Minas Gerais. O modelo de árvores individual independente da distância foi composto pelos submodelos para projeção do diâmetro e altura, e outro para estimar o volume, não sendo realizada a modelagem da mortalidade.

Martins (2011) estudou o crescimento e produção de plantios comerciais de clones de eucalipto não desbastados localizados em Monte Dourado, Pará, com idades de 24 a 84 meses, a partir da modelagem individual independente da distância. Os submodelos empregados foram aqueles para estimar o diâmetro e altura, e probabilidade de mortalidade por classe diamétrica. O índice de competição com melhor desempenho foi o BAI (índice de área basal). O modelo forneceu estimativas precisas e consistentes.

Castro (2011) empregou a modelagem de árvores individuais independente da distância para povoamentos de eucalipto com idade variando de 24 a 72 meses, situados na cidade de Monte Dourado, estado do Pará. Além dos modelos de árvores individuais, as estimativas do crescimento e produção foram obtidas por meio de redes neurais artificiais e autômatos celulares. Os resultados foram considerados satisfatórios, sobretudo aqueles obtidos com o uso das redes neurais e autômatos celulares.

Castro (2012) desenvolveu um modelo completo de árvore individual para espécies de uma floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de sucessão ecológica, situada no município de Viçosa, Minas Gerais, empregando redes neurais artificiais. Índices de competição independentes, dependentes e semi-independentes foram empregados para avaliar o grau competitivo das árvores. O modelo de árvores

individuais proporcionou estimativas precisas do crescimento e da produção, para todos os níveis de detalhamento estudados.

4.4 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO

A competição pode ser definida como uma interação entre árvores causada por compartilhamento de recursos em quantidade limitada, o que acarreta redução da sobrevivência, crescimento e/ou a reprodução do indivíduo em questão (BEGON et al., 1986). Quando a disponibilidade de recursos em um povoamento florestal é inferior ao exigido para o crescimento ideal das árvores, essas estão em competição direta entre si (PRETZSCH, 2009).

A competição influencia o crescimento e a dinâmica florestal de várias maneiras. Para as árvores, a competição reduz o crescimento, especialmente em diâmetro, afeta o desenvolvimento da copa e aumenta a probabilidade de mortalidade. A competição também pode causar estagnação, estratificação e instabilidade. Consequentemente, um índice de competição deve levar em conta o número, tamanho e distribuição dos indivíduos (WEISKITTEL et al., 2011).

Existem vários tipos de competição, sendo uma das distinções mais importantes aquela em que as árvores competem por recursos acima e abaixo da superfície do solo. A primeira se refere fundamentalmente à competição por luz, enquanto a segunda na aquisição de água e nutrientes do solo. Dois outros tipos de competição geralmente distinguidos na área florestal se referem às espécies competidoras e à simetria das interações competitivas. Assim, competição intraespecífica é aquela entre indivíduos da mesma espécie, enquanto interespecíficas é aquela entre indivíduos de espécies diferentes (WEISKITTEL et al., 2011).

Dependendo da formulação, os índices de competição assumem implicitamente competição assimétrica ou simétrica dos recursos entre árvores vizinhas. O conceito básico de assimetria competitiva é que plantas maiores têm uma vantagem competitiva sobre plantas menores. Da mesma forma, a concorrência simétrica implica que os efeitos competitivos de indivíduos maiores e menores são, de certo modo, iguais (WEINER, 1990). Todos os índices de competição independente de distância baseados nas árvores maiores à árvore-objeto assumem implicitamente competição assimétrica, refletindo, principalmente, a competição por luz (BURKHART; TOMÉ, 2012).

O efeito da competição é normalmente expresso por uma formulação matemática, comumente referido como um "índice de competição", representando quanto cada árvore é afetada por sua vizinhança. Funções usadas para quantificar a competição variam de formulações simples, expressando a posição hierárquica da árvore dentro do povoamento ou parcela, até índices mais complexos que expressam o tamanho, distância e o número de árvores vizinhas (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Neste sentido, índices de competição representam medidas de disponibilidade de recursos das árvores individuais no povoamento. Esses índices empregam o diâmetro, altura, tamanho da copa e distância entre árvores vizinhas no povoamento para quantificar a situação competitiva das árvores individuais, o impacto no crescimento (PRETZSCH, 2009) e para prever com maior precisão o incremento das árvores e a mortalidade (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Conforme mencionado anteriormente, Munro (1974) classificou os índices de competição em duas categorias, dependentes e independentes da distância, representando aqueles que necessitam de informações espaciais das árvores e os que não empregam essas medidas, respectivamente. Ainda, há uma terceira categoria, denominados de índices semi-independentes, os quais foram desenvolvidos para parcelas circulares, sendo espacialmente restritos às árvores mais próximas da árvore-objeto (STAGE; LEDERMANN, 2008).

A escolha das árvores vizinhas que afetam o crescimento de uma árvore-objeto é de suma importância na modelagem da competição entre árvores. Apesar de vários métodos terem sido propostos para a escolha das árvores vizinhas para aplicação dos índices dependentes da distância, as abordagens mais comuns incluem a utilização de uma área fixa ou número fixo de competidores; contagem angular; área sobreposta; ângulo de eliminação da competição; e seleção das árvores competidoras usando um cone de busca vertical (PRETZSCH, 2009; BURKHART; TOMÉ, 2012).

A distância e o tamanho das árvores que rodeiam a árvore-objeto são os componentes fundamentais para modelos de crescimento dependentes da distância (LAAR; AKÇA, 2007). Para Weiskittel et al. (2011), os índices dependentes da distância podem ser agrupados em cinco classes, sendo: relação tamanho-distância; zona de influência competitiva; índice de espaço de crescimento; visão completamente aberta; e métodos de interceptação de luz.

Índices de distância independente não exigem as coordenadas de cada árvore, pois representam funções simples de variáveis em nível de povoamento e/ou dimensões da

árvore-objeto em relação ao valor médio ou máximo de árvores do povoamento (BURKHART; TOMÉ, 2012). As variáveis independentes podem ser em nível de povoamento, variáveis que descrevem o potencial de crescimento da árvore individual, ou uma combinação de ambas (LAAR; AKÇA, 2007).

Os índices independentes podem ser distribuídos em cinco classes. A primeira corresponde às dimensões relativas, as quais medem a posição hierárquica da árvore-objeto dentro do povoamento; área proporcional à área basal da árvore, consistindo em dividir a área da parcela entre as árvores individuais conforme sua dimensão em relação à dimensão da árvore média do povoamento; razão de copa, que é a relação entre o comprimento da copa e a altura total da árvore; medidas baseadas nas árvores maiores que a árvore-objeto; e medidas baseadas nas variáveis de copa avaliadas em uma determinada percentagem do comprimento da copa (PRETZSCH, 2009; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Vários índices de competição dependentes e independentes da distância foram propostos, estudados e comparados. Apesar dos avanços obtidos, não há um consenso sobre a superioridade de algum, uma vez que a habilidade preditiva varia conforme a espécie (TONINI, 2007) e condições do povoamento em estudo (CURTO, 2015). Pretzsch (2009) atestou que para povoamentos homogêneos tanto modelos dependentes quanto independentes da distância estimam o crescimento do povoamento com igual acurácia. Daniels (1976) e Martin e Ek (1984) afirmaram que a maior parte dos trabalhos que evidenciaram esse fato procederam de povoamentos.

Daniels, Burkhart e Clason (1986) compararam vários índices de competição para a predição do crescimento de *P. taeda* no estado americano da Luisiana. Os melhores índices dependentes da distância mostraram pouca ou nenhuma vantagem aos melhores índices independente de distância, tanto na correlação simples como na múltipla.

Wimberly e Bare (1996) avaliaram o crescimento em área basal de árvores individuais a partir de equações dependentes e independentes da distância, para *Tsuga heterophylla* e *P. menziesii*. O povoamento é proveniente de regeneração natural, com mesma idade, situado no sudoeste da ilha de Vancouver. Os autores concluíram que a adição do índice espacial produziu apenas um pequeno aumento no coeficiente de determinação, para ambas as espécies.

Ledermann (2010) comparou vários índices dependentes e semi-independentes em povoamentos mistos de coníferas na Áustria. A conclusão foi de que os melhores

índices de cada categoria explicaram igualmente a variação do incremento em área basal, sugerindo que nenhum índice de competição ou categoria é universalmente superior.

Outros trabalhos comprovaram pouca ou nenhuma superioridade dos índices dependentes em relação aos independentes da distância. Dentre esses, podem ser citados os trabalhos de Alemdag (1978), Noone e Bell (1980) e Tomé e Burkhart (1989).

Os principais índices de competição empregados na modelagem de árvores individuais podem ser encontrados em Davis e Johnson (1987), Biging e Dobbertin (1995), Prodan et al. (1997) e Soares e Tomé (1999). E mais recentemente, nos trabalhos de Martins (2011), Castro (2012) e Curto (2015).

Nos últimos anos no Brasil, estudos sobre competição foram publicados para diferentes espécies e regiões, envolvendo todas as categorias de índices de competição. Para povoamentos monoespecíficos e equiâneos, predominam os índices independentes da distância, com destaque ao BAL (*Basal Area larger*) e BAI (*Basal Area Index*) (Stage, 1973), índices propostos por Glover e Hool (1979) e aqueles propostos por Lorimer (1983), além de suas modificações.

Para espécies ou grupos de espécies de florestas mistas, embora sejam empregados índices dependentes da distância, a maioria dos trabalhos empregaram índices dependentes da distância, sendo o de Hegyi (1974) um dos mais avaliados. Em relação aos índices semi-independentes da distância, representam a categoria menos avaliada.

4.5 MORTALIDADE

Mortalidade de árvores é um fator chave que influencia a dinâmica da floresta, portanto, sua estimativa requer atenção especial (YANG et al., 2003). A mortalidade representa um importante componente do modelo de crescimento em nível de árvore individual (AVILA; BURKHART, 1992; DOBBERTIN; BIGING, 1998). De todos os atributos previstos em modelos de crescimento, a mortalidade continua sendo um dos mais difíceis, devido à sua natureza estocástica e de ocorrência casual (WEISKITTEL et al., 2011). Reineke (1933) deu importantes contribuições ao entendimento do início da competição que induz a mortalidade em povoamentos equiâneos.

Dois tipos de mortalidade normalmente ocorrem em povoamentos equiâneos, a regular e a irregular (STAEBLER, 1955; WEISKITTEL et al., 2011). A mortalidade regular é aquela provocada por fatores não catastróficos, como competição, idade e fatores genéticos ou senescência (MIRANDA et al., 1989; DOBBERTIN; BIGING,

1998). Mortalidade irregular em um povoamento equiâneo é geralmente associada com algum evento catastrófico ou aleatório, como quedas provocadas por ventos, fogo, inseto ou epidemia de doenças. Em povoamentos de pinus, além dos eventos mencionados, tem-se o ataque do macaco-prego (*Sapajus nigritus*, Goldfuss, 1809), com danos relevantes em vários casos. Logo, a mortalidade irregular é difícil de se prever (LIN, 1973), embora alguns modelos preveem ambos os tipos de mortalidade (WEISKITTEL et al., 2011).

As estimativas de mortalidade regular podem ser baseadas em teorias de limitação da densidade do povoamento ou relações empíricas ajustadas a dados do povoamento ou em nível de árvore. A maioria das abordagens teóricas e empíricas dependem de estimativas da densidade do povoamento, competição ou vigor da árvore, mas outros métodos também se baseiam na idade da árvore (VANCLAY, 1994).

Muitas vezes, a modelagem do crescimento é realizada desconsiderando-se a mortalidade, ao assumir que essa não ocorre em povoamentos bem manejados (VANCLAY, 1994). A precisão da estimativa da mortalidade ou sobrevivência da árvore influencia diretamente na precisão dos modelos de crescimento (SIMS et al., 2009).

Hawkes (2000) afirmou que existem alguns problemas principais associados com a modelagem da mortalidade. O primeiro diz respeito à falta de observações a longo prazo, pois a mortalidade pode ser causada por diversos fatores bióticos e abióticos que se tornam relevantes em diferentes pontos no tempo. Outro problema é relacionado ao uso inadequado de modelos, já que a maioria foi desenvolvida com pressupostos específicos. Finalmente, tem-se a influência da atividade humana, sendo um complicador para a previsão adequada do modelo.

A mortalidade pode ser abordada ao nível de povoamento ou em nível de árvore individual. Apesar das dificuldades em prever a mortalidade em nível de povoamento, várias equações estão disponíveis para estimar a mortalidade para árvores individuais (WEISKITTEL et al., 2011).

As principais diferenças entre equações de mortalidade de árvores individuais se referem ao tipo de dados utilizados; aos métodos estatísticos para estimar parâmetros; à duração do período de previsão; ao uso de equações adicionais para restringir as previsões; e às variáveis da árvore e do povoamento empregadas nas previsões (WEISKITTEL et al., 2011).

Quase todas as equações de mortalidade em nível de árvore usam regressão logística para estimar essa variável (WEISKITTEL et al., 2011). Como exemplos, o modelo logístico foi empregado para estimar a mortalidade nos trabalhos de Monserud

(1976), Hamilton (1986), Monserud e Sterba (1999), Cao (2000), Cao e Strub (2008), Sims et al. (2009), Pukkala, Lahde e Laiho (2009), Martins (2011) e Castro (2011).

Outras funções também foram utilizadas para estimar a probabilidade de mortalidade. Dentre essas, tem-se modelo exponencial (MOSER, 1972), o modelo linear de WEST (1981), que emprega o índice de competição como única variável independente, função Weibull (KOUBA, 1989), modelo biológico de Richards (BUFORD; HAFLEY, 1985) e função gama (KOBÉ; COATES, 1997).

4.6 MODELOS DE INCREMENTO NA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

Embora o crescimento da árvore ocorra em todos os seus componentes, é dada maior importância nas mudanças no diâmetro e na altura da árvore, por causa de sua facilidade de mensuração e forte correlação com o volume total da árvore (WEISKITTEL et al., 2011). Equações e modelos para estimar o crescimento das árvores individuais em povoamentos equiâneos são normalmente subdivididos em modelos dependentes, independentes (LAAR; AKÇA, 2007) e semi-independentes da distância (STAGE; LEDERMANN, 2008). Como mencionado anteriormente, os modelos de árvores individuais independentes da distância consistem, tipicamente, de uma equação de incremento em diâmetro e incremento em altura, ou uma equação de altura e diâmetro, e uma função de mortalidade (BURKHART; TOMÉ, 2012). Os demais modelos utilizam essas mesmas variáveis, com adição da posição das árvores no povoamento.

Duas abordagens conceituais têm se mostrado úteis para estimar o crescimento da árvore individual. A primeira, a partir da estimativa direta do crescimento empregando a análise de regressão, e a segunda, de forma indireta e robusta, pela utilização de uma função modificadora do crescimento potencial (VANCLAY, 1994; PRETZSCH, 2009; WEISKITTEL et al., 2011). A utilização de uma função de incremento com modificadores multiplicativos tem a vantagem de ser limitada e robusta, porque a estimativa do incremento nunca pode exceder o máximo incremento ou potencial. A desvantagem está relacionada à dificuldade em estimar o incremento potencial e, consequentemente, diversas aproximações são utilizadas (WEISKITTEL et al., 2011). Martins (2011) relatou que não há confirmação da superioridade das funções modificadoras em relação às equações de regressão.

O aumento do tamanho do fuste pode ser modelado em função do incremento em diâmetro, incremento em área basal, do diâmetro futuro ou da área basal futura (VANCLAY, 1994). Conforme WEISKITTEL et al. (2011), algumas variáveis dependentes utilizadas para estimar o incremento diamétrico futuro foram o incremento em diâmetro (HANN et al., 2006; WEISKITTEL et al., 2007), diâmetro ao quadrado sem casca (COLE e STAGE, 1972), incremento em diâmetro relativo (YUE et al., 2008) e incremento em área transversal sem casca (MONSERUD; STERBA, 1996).

Existem divergências com respeito à preferência da modelagem do incremento em área transversal sobre a modelagem do incremento em diâmetro, já que o primeiro caso supostamente seria mais correlacionado com o crescimento em volume de uma árvore e, ainda, devido apresentarem maior coeficiente de determinação. No entanto, essa diferença na qualidade do modelo é em virtude da estrutura do erro, implicando em uma relação meramente funcional, contrariamente em superioridade de um modelo sobre o outro (VANCLAY, 1994; WEISKITTEL et al., 2011). West (1980) não encontrou diferença em empregar diâmetro ou a área transversal para prever o incremento diamétrico em povoamentos de eucalipto com rotação de 6 anos.

Outra discussão é com relação ao emprego do diâmetro futuro ou o incremento em diâmetro como variável dependente a ser empregada na modelagem. Vanclay (1994) afirmou que o aumento do diâmetro do fuste pode ser expresso tanto por uma função de produção ou como uma função de crescimento. A decisão de modelar o crescimento ou produção, seja para diâmetro ou altura, geralmente está baseada em conveniências ou preferências dos pesquisadores, visto que ambas fornecem estimativas adequadas (CHASSOT, 2009).

Weiskittel et al. (2011) afirmaram que a modelagem do incremento em altura é mais complexa àquela do incremento em diâmetro devido à maior variabilidade dessa variável no povoamento, ao número limitado de remediações e uma ligação mais estreita com fatores ambientais àqueles do povoamento. Segundo os mesmos autores, o incremento em altura pode ser obtido a partir de uma função modificadora do crescimento potencial e por funções de regressão, assim como para o incremento diamétrico. Além disso, pode ser indiretamente estimado pelo incremento em diâmetro e sua estimativa no final do período de crescimento. Os valores inicial e final de diâmetro são usados em uma relação hipsométrica para calcular as alturas no início e final do período de crescimento. Dessa forma, o incremento em altura é calculado pela diferença entre as alturas estimadas.

REFERÊNCIAS

- ALEGRIA, C. M. M. **Estudo da dinâmica do crescimento e produção dos povoamentos naturais de pinheiro bravo na região de Castelo Branco**. 534 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2004.
- ALEMDAG, I. S. Evaluation of some competition indexes for the prediction of diameter increment in planted white spruce. **Can. For. Serv. Inf. Rep.**, Ottawa, 39 p., 1978.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Book, 1994. 408p.
- AVILA, O. B.; BURKHART, H. E. Modeling survival of loblolly pine trees in thinned and unthinned plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v.22, n.12, p.1.878-1.882, 1992. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x92-245>
- BACHA, C. J. C. Análise da Evolução do Reflorestamento no Brasil. **Revista de Economia Agrícola**, v.55, n.2, p.5-24, 2008.
- BAILEY, R. L. Individual tree growth derived from diameter distribution models. **Forest Science**, v.26, n.4, p.626-632, 1980.
- BEGON, M.; HARPER, J. L.; TOWNSEND, C. R. **Ecology: individuals, populations and communities**. Oxford: Blackwell Science, 1986. 945p.
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. Evaluation of Competition Indices in Individual Tree Growth Models. **Forest Science**, v.41, n.2, p.360-377, 1995.
- BUFORD, M. A.; HAFLEY, W. L. Probability Distributions as Models for Mortality. **Forest Science**, v.31, n.2, p.331-341, 1985.
- BUGMANN, H. A review of forest gap models. **Climatic Change**, v.51, n.3, p.259-305, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1012525626267>
- BURKHART, H. E.; CAO, Q. V.; WARE, K. D. **A comparison of growth and yield prediction models for loblolly pine**. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, School of Forestry and Wildlife Resources, 1981. 59p. (Publ., FWS-2).
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. New York: Springer, 2012. 457p. DOI: [10.1007/978-90-481-3170-9](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9)
- CAO, Q. V. Prediction of annual diameter growth and survival for individual trees from periodic measurements. **Forest Science**, v.46, n.1, p.127-131, 2000.
- CAO, Q. V.; STRUB, M. Evaluation of four methods to estimate parameters of an annual tree survival and diameter growth model. **Forest Science**, v.54, n.6, p.617-624, 2008.

CASTRO, R. V. O. **Modelagem de árvore individual para uma floresta estacional Semidecidual utilizando redes neurais**. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGUI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista. **Revista Ciência Florestal**, v.21, n.2, p.303-313, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098>

CHASSOT, T. **Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na Floresta Ombrófila Mista**. 48 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: A quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.

CONTRERAS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, v.262, n.11, p.1.939-1.949, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.031>

CRECENTE-CAMPO, F.; MARSHALL, P.; SOALLEIRO, R. R. Modeling non-catastrophic individual-tree mortality for *Pinus radiata* plantations in northwestern Spain. **Forest Ecology and Management**, v.257, n.4, p.1.542-1.550, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.007>

CURTO, R. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

DANIELS, R. F. Notes: simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. **Forest Science**, v.22, n.4, p.454-456, 1976.

DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal Forest Research**, Vancouver, v.16, n.6, p.1.230-1.237, 1986. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x86-218>

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**, 3 ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987. 790p.

DOBBERTIN, M.; BIGING, G. S. Using the non-parametric classifier CART to model forest tree mortality. **Forest Science**, v.44, n.4, p.507-516, 1998.

DOBNER JR, M.; HIGA, A. R.; TOMAZELLO FILHO, M. Manejo de Povoamentos de *Pinus taeda* L. e de *Eucalyptus dunnii* MAIDEN para usos múltiplos da madeira. In: 4º Congresso Florestal Paranaense, 2012, Curitiba. **Anais**, 2012.

EK, A. R.; MONSERUD, R. A. Trials with program FOREST: growth and reproduction simulation for mixed species even and uneven-aged forest stands. In: FRIES, J. (Ed.). **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm: Royal College of Forestry. 1974. p. 56-73.

FOX, J. C.; BI, H.; ADES, P. K. Spatial dependence and individual-tree growth models: I. Characterising spatial dependence. **Forest Ecology and Management**, v.245, n.1, p.10-19, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.04.025>

FREIRE, J. P. A. **Modelação do crescimento da árvore individual independente da distância para a *Pinus pinaster* Aiton. em Portugal**. 115 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Lisboa, 2002.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v.25, n.2, p.275-282, 1979.

HAMILTON, D. A. A logistic model of mortality in thinned and unthinned mixed conifer stands of Northern Idaho. **Forest Science**, v.32, n.4, p.989-1.000, 1986.

HAWKES, C. Woody plant mortality algorithms: description, problems and progress. **Ecological Modelling**, v.126, n.2-3, p.225-248, 2000. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(00\)00267-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(00)00267-2)

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; SILVA, R. P.; LIMA, A. N.; TEIXEIRA, L. M.; CARNEIRO, V. M. C.; FELSEMBURGH, C. A.; TRIBUZY, E. S. **Noções Básicas de Manejo Florestal**. Manaus: INPA. 2008. 270p.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J.(Ed.) **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm Sweden: Royal College of Forestry, 1974. p.74-90.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ: **Relatório da Indústria Brasileira de Árvores**. Brasília: IBÁ, ano base 2014. 64p. Disponível em: <http://www.iba.org/pt/>. Acesso em: 10/11/2015.

KOBE, R. K.; COATES, K. D. Models of sapling mortality as a function of growth to characterize interspecific variation in shade tolerance of eight tree species of northwestern British Columbia. **Canadian Journal of Forest Research**, v.27, n.2, p.227-236. 1997. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x96-182>

KOUBA, J. The theory of an estimate of the development of calamities and of management of the process of forest adjustment to normal forest. **Lesnictvi**, v.35, n.10, p.925-944, 1989.

KRONKA, F. J. N.; BERTOLANI, F.; PONCE, R. H. **A Cultura do Pinus no Brasil**. São Paulo: Sociedade Brasileira de Silvicultura, 2005. 160p.

LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Netherlands: Springer, 2007. 383p.

LANDSBERG, J. J. Physiology in forest models: History and the future. **Forest Biometry, Modelling and Information Sciences**, v.1, p.49-63, 2003.

LEDERMANN, T. Evaluating the performance of semi-distance-independent competition indices in predicting the basal area growth of individual trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v.40, n.4, p.796-805, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/X10-026>

LIN, J. Y. Stand growth simulation models for Douglas-fir and western hemlock in the northwest United States. In: FRIES, J. (Ed.). **Growth models for tree and stand simulation**. Stockholm: Royal College of Forestry, 1973. p.102-118.

LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.6, n.4, p.343-360, 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90042-7](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(83)90042-7)

MÄKELÄ, A.; LANDSBERG, J.; EK, A. R.; BURK, T. E.; TER-MIKAELIAN, M.; AGREN, G. I.; OLIVER, C. D.; PUTTONEN, P. Process-based models for forest ecosystem management: Current state of the art and challenges for practical implementation. **Tree Physiology**, n.20, n.5-6, p.289-298, 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/treephys/20.5-6.289>

MANCINI, J. C. Mercado de Toras. In: WORKSHOP DE DESBASTE E PODA EM PLANTIOS FLORESTAIS 2011, Colombo. **Anais...** Colombo: Associação Paranaense de Empresas de Base Florestal, 2011. [CD-ROM].

MARTIN, G. L.; EK, A. R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, v.30, n.3, p.731-743, 1984.

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MIRANDA, R. C.; CAMPOS, J. C. C.; PAULA NETO, F.; OLIVEIRA, L. M. Predição da mortalidade regular para eucalipto. **Revista Árvore**, v.13, n.2, p.152-173, 1989.

MONSERUD, R. A. Evaluating forest models in a sustainable forest management context. **Forest Biometry, Modelling and Information Sciences**, v.1, p.35-47, 2003.

MONSERUD, R. A. Simulation of forest tree mortality. **Forest Science**, v.22, n.4, p.438-444, 1976.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Modelling individual tree mortality for Austrian forest species. **Forest Ecology and Management**, v.113, n.2-3, p.109-123, 1999. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00419-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00419-8)

MOSER, J. W. Dynamics of an uneven-aged forest stands. **Forest Science**, v.18, n.3, p.184-191, 1972.

NEUNHAM, R. M. **The development of a stand model for Douglas-fir**. 201 f. Thesis (PhD) - University of British Columbia, Vancouver, 1964. 201p.

NOONE, C. S.; BELL, J. F. **An evaluation of eight inter-tree competition indices**. Forest Research Laboratory School of Forest Oregon State University, Corvallis. Research Note 66. 6p. 1980.

OLIVEIRA, E. B. **Um sistema computadorizado de prognose do crescimento e produção de *Pinus taeda* L., com critérios quantitativos para avaliação técnica e econômica de regimes de manejo**. 130 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model**. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2009. 664p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; DURSKEY, J. The single tree based stand simulator SILVA. Construction, application and evaluation. **Forest Ecology and Management**. v.162, n.1, p.3-21, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00047-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00047-6)

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. (Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible). San José, Costa Rica: IICA. 1997. 586p.

PUKKALA, T.; LAHDE, E.; LAIHO, O. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. **Forest Ecology and Management**, v.258, n.3, p.207-216, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.052>

PUKKALA, T. Simulation model for natural regeneration of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens*. **Silva Fennica**, v.21, n.1, p.37-53, 1987. DOI: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.a15462>

REINEKE, L. H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.46, n.7, p.627-638, 1933.

SALLES, T. T. **Modelagem de crescimento e produção de clones de eucalipto em um sistema agroflorestal**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

Sociedade Brasileira de Silvicultura – SBS: **Fatos e Números do Brasil Florestal**, 2006. 105p. Disponível em: <<http://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/SBS-2005.pdf>>. Acesso em 28/03/2016.

SCHUCHOVSKI, M. S. **Diagnóstico e planejamento do consumo de madeira e da produção em plantações florestais no estado do Paraná**. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SHIMIZU, J. Y. Silvicultura de Pinus para o sul do Brasil. **Revista da Madeira**, v.6, n.37, p.32-35, 1997.

SIMS, A.; KIVISTE, A.; HORDO, M.; LAARMANN, D.; GADOW, K. von. Estimating tree survival: a study based on the Estonian Forest Research Plots Network. **Annales Botanici Fennici**, v.46, n.4, p.336-352, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5735/085.046.0409>

SNOWDON, P.; WOOLLONS, R. C.; BENSON, M. L. Incorporation of annual climatic indices into models of *Pinus radiata* in a spacing experiment. **New Forests**, v.16, n.2, p.101-123, 1998. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006524609459>

SOARES, P.; TOMÉ, M. Distance dependent competition measures for eucalyptus plantations in Portugal. **Annals of Forest Science**, v.56, n.4, p.307-319, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19990405>

SPATHELF, P.; NUTTO, L. **Modelagem aplicada ao crescimento e produção florestal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria. 71p. 2000.

STAEBLER, G. R. **Gross yield and mortality tables for fully stocked stands of Douglas-fir**. U.S. Forest Serv. Pacific Northwest Forest and Range Expt. Sta. Res. Paper 14, 20p. Portland, Oregon. 1955.

STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, Vancouver, v.38, n.4, p.890-898, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/X07-192>

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137, 1973. 32p.

TAYLOR, A. R.; CHEN, H. Y. H.; VANDAMME, L. A review of forest succession models and their suitability for forest management planning. **Forest Science**, v.55, n.1, p.23-36, 2009.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v.35 n.3, p.816-831, 1989.

TONINI, H. **Índice de competição e o seu uso na modelagem do crescimento das árvores**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2007. 30p. (Documentos / Embrapa Roraima; 8).

TUOTO, M.; HOEFLICH, V. A.; SYLVESTRE, A. H. Mercado internacional de produtos de madeira sólida de pinus. **Revista da Madeira**, n.83, p.6-8, 2004.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312p.

WEBER, K. S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WEINER, J. Asymmetric competition in plant populations. **Trends in Ecology and Evolution**, v.5, n.11, p.360-364, 1990. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90095-U](http://dx.doi.org/10.1016/0169-5347(90)90095-U).

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW, J. A. J; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Oxford: John Wiley & Sons, 2011. 415p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119998518>

WEST, P. W. Simulation of diameter growth and mortality in regrowth eucalypt forest of southern Tasmania. **Forest Science**, v.27, n.3, p.603-616, 1981.

WEST, P. W. Use of diameter increment and basal area increment in tree growth studies. **Canadian Journal of Forest Research**, v.10, n.1, p.71-77, 1980. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x80-012>

WIMBERLY, M. C.; BARE, B. B. Distance-dependent and distance-independent models of Douglas-fir and western hemlock basal area growth following silvicultural treatment. **Forest Ecology and Management**. v.89, n.1-3, p.1-11, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03870-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03870-4)

YANG, Y.; TITUS, S. J.; HUANG, S. Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. **Ecological Modelling**, v.163, n.3, p.209-222, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00008-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00008-5)

YEMSHANOV, D.; PERERA, A. H. Synthesizing published knowledge of boreal forest cover change for large-scale landscape dynamics modelling. **Forestry Chronicle**, v.79, n.1, p.132-146, 2003. DOI: <http://dx.doi.org/10.5558/tfc79132-1>

CAPÍTULO I

DEFINIÇÃO DE CLASSES DE SÍTIO, RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA E VOLUMÉTRICA PARA POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi elaborar curvas de índice de sítio e ajustar equações hipsométrica e volumétrica para povoamentos de pinus. Os dados foram provenientes de parcelas permanentes de povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L., localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná, com idade de 3,0 a 21,4 anos. Para a distinção em classes de sítio, foi utilizado o modelo biológico de Chapman-Richards e o método da curva-guia, considerando uma idade índice de 18 anos. Foi aplicado o teste de anamorfismo ou polimorfismo, assim como analisado o coeficiente de variação em altura dominante, para avaliar o padrão das curvas de sítio geradas. Modelos hipsométricos genéricos foram testados para estimar a altura total. O modelo de Schumacher e Hall foi ajustado para estimar o volume total com casca, considerando classes de idade. Os resultados demonstraram que o modelo biológico apresentou estatísticas adequadas para estimar a altura dominante, permitindo construir as curvas de índice de sítio. Foram definidas três classes de sítio. A partir dos testes de anamorfismo e coeficiente de variação, as curvas assumiram padrão anamórfico. O modelo hipsométrico não linear foi o mais adequado para estimar a altura total, sendo em função da idade, índice de sítio e diâmetro à altura do peito. Finalmente, o modelo volumétrico de Schumacher e Hall apresentou estatísticas aceitáveis para estimar os volumes totais com casca, para todas as classes de idade consideradas.

Palavras-chave: Índice de sítio; anamorfismo; equação de altura, equação de volume.

CHAPTER I

DEFINITION OF SITE CLASSES, HEIGHT-DIAMETER AND VOLUME RELATIONSHIP FOR *Pinus taeda* L. STANDS

ABSTRACT

The aim of this study was to develop site index curves and adjust a hypsometric and volumetric equation for pine stands. Data were obtained from permanent plots unthinned stands of *Pinus taeda* L., located in the region of Telêmaco Borba, State of Parana, Brazil, aged from 3.0 to 21.4 years. For the distinction in site classes, the biological model from Chapman-Richards and the method of the guide curve were used, considering an index age of 18 years. The anamorfismo or polymorphism test was applied, as well as the coefficient of variation of dominant height was analyzed to evaluate the pattern of the generated site curves. Generic hypsometric models were tested to estimate total height. The Schumacher and Hall model was adjusted to estimate total outside bark volume, by age classes. The results showed that the biological model estimated satisfactorily the dominant height, allowing to construct the site index curves. Three site classes were defined. Based on the used tests, the curves assumed anamorphic pattern. The nonlinear hypsometric model was that best estimate the total height, in function of age, site index and diameter at breast height. Finally, the Schumacher and Hall volumetric model showed acceptable statistics to estimate the total outside bark volumes, for all age classes considered.

Keywords: Site index; anamorphism; height equation; volume equation.

1 INTRODUÇÃO

O ato de manejar um povoamento envolve desde a etapa de planejamento do povoamento até a comercialização de seus produtos. O manejador florestal faz uso de ferramentas que subsidiam informações que o auxiliam na tomada de decisões. É primordial e de interesse de qualquer administrador florestal conseguir quantificar e prognosticar, com confiabilidade, o estoque de seus povoamentos. Para isso, existem algumas atividades essenciais que são frequentemente realizadas. Dentre essas, tem-se o emprego de modelos estatísticos com o intuito de estimar variáveis dendrométricas, como altura e volume, assim como distinguir classes de produtividade, a partir da definição dos sítios.

Segundo Skovsgaard e Vanclay (2008), o sítio é o espaço geográfico considerado homogêneo em relação às características físicas e biológicas. Sua determinação é fundamental para a distinção das classes de produtividade e, conseqüentemente, para o manejo florestal e todo o sistema de prognose. O sítio é peça chave em trabalhos que envolvam projeção da produção ou determinação do crescimento.

Conforme Vanclay (1994), a característica do sítio é essencial na determinação da dinâmica de povoamentos florestais. Além disso, representa uma variável requerida nos modelos de predição do crescimento e da produção (SCOLFORO; MACHADO, 1988; TONINI; SCHNEIDER; FINGER, 2006). Embora o sítio possa ser avaliado por métodos diretos e indiretos, a classificação direta do potencial produtivo de povoamentos é realizada em maior intensidade, especialmente a partir da relação da altura das árvores dominantes com a idade (SELLE; PAULESKI; BRAZ, 2008).

Apesar de existirem diferentes métodos para a construção de curvas de índice de sítio, o mais utilizado é o método da curva-guia (TÉO; BRESSAN; COSTA, 2011; PEGO; ASSIS; CABACINHA, 2015; CASTRO, 2015; RETSLAFF et al., 2015; BESTRÁN; CHAUCHARD; PASTUR, 2015). Além da importância mencionada do sítio, representa importante fator de estratificação ou, mesmo, variável independente em modelos de variáveis dendrométricas, como em modelos para estimar altura de árvores.

Na ocasião das medições em campo, nem todas as árvores têm sua altura medida devido, em maior parte, à redução de custos. Ainda, possibilita redução de tempo das medições, visto que alguns problemas podem ocorrer, como falta de visibilidade do topo da árvore em povoamentos densos, e a ocorrência de ventos (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2013). Dessa forma, a altura das demais árvores é obtida por uma função que relaciona a altura com o diâmetro à altura do peito, definindo a relação hipsométrica (THIERSCH et al., 2013).

Como forma de obter uma função genérica que estime a altura para diferentes condições, têm sido empregados modelos que consideram outras variáveis dendrométricas, assim como parâmetros do povoamento, como a idade e índice de sítio (NOGUEIRA, 2003; RIBEIRO et al., 2010; MIRANDA et al., 2014; MENDONÇA et al., 2015; RETSLAFF et al., 2015). Isso torna a equação mais abrangente (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2013).

A obtenção da altura é realizada, principalmente, para possibilitar o cálculo do volume individual das árvores. O volume sólido de uma árvore pode ser determinado de forma analítica, com a cubagem rigorosa, que consiste na medição das variáveis diâmetro e comprimento de seções ao longo do tronco, assumindo alguns pressupostos sobre a forma; pode ser também graficamente, em função de informações do diâmetro e altura da árvore, tomados ao longo do fuste, ou pelo deslocamento de água (princípio de Arquimedes e método do xilômetro), e a partir do peso da árvore (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). Por outro lado, a estimativa do volume do tronco de árvores em pé, em geral, pode ser realizada com o uso de fatores de forma, quocientes de forma e equações de volume (SOARES; PAULA NETO; SOUZA, 2011), além de funções de afilamento.

A cubagem rigorosa constitui a forma mais empregada para obter o volume "real" da árvore. Há vários métodos para realizar a cubagem, sendo um dos mais empregados o de Smalian. A partir dos dados de cubagem de árvores representativas da população, são ajustados modelos estatísticos com a finalidade de obter equações para estimar o volume individual.

As equações de volume estimam o volume por árvore em função ou do diâmetro, ou do diâmetro e altura, ou, ainda, do diâmetro, altura e forma do tronco da árvore (fator de forma ou quociente de forma), resultando em, respectivamente, três tipos básicos de tabelas: local ou simples entrada, regional ou dupla entrada, e tabela formal (SILVA, 1989; SCHNEIDER, 1993). Em geral, as equações mais utilizadas são de dupla entrada, tendo como variáveis independentes o diâmetro à altura do peito e a altura da árvore (HIGUCHI, 1992).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi elaborar curvas de índice de sítio para povoamentos não desbastados de *P. taeda*, localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná, bem como ajustar modelos hipsométricos e volumétrico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA

O relevo da região de estudo é suavemente ondulado e a altitude média de 850 m acima do nível do mar. A temperatura média anual é de 23,0°C, com temperatura mínima e máxima histórica igual a -5,2 e 37,0°C, respectivamente. A precipitação anual média oscila em torno de 1.470 mm ao ano. Conforme a classificação de Köppen, o clima do local é tipo Cfb, isto é, temperado úmido, sem estação seca, com verão fresco e geadas periódicas (FIGURA, 2010; NUNES et al., 2010).

2.2 ORIGEM E DETALHAMENTO DOS DADOS

Os dados empregados nessa pesquisa provêm de povoamentos de *Pinus taeda* L. não desbastados da empresa Klabin S.A., cujas mudas são advindas de pomar clonal de primeira geração, com espaçamento inicial de plantio de 2,5 x 2,5 m, situados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná. As informações foram obtidas de uma rede de parcelas permanentes, distribuídas na área com intensidade de, aproximadamente, uma parcela por hectare. Após a definição do ponto amostral, indicando o início da parcela, o método de amostragem empregado consistiu na contabilização de 10 linhas de plantio e 10 plantas, sendo realizado o esquadreamento dos limites, medindo-se o comprimento e largura exatos. As remediações das parcelas ocorreram nos intervalos de um, dois ou três anos.

Em cada parcela, foram medidos os diâmetros à altura do peito (d – medido a 1,3 m do solo) de todas as árvores e altura total (h) das 10 primeiras. Ainda, foram medidas as alturas das árvores dominantes conforme metodologia proposta por Assmann (1961), correspondentes às 100 árvores sadias mais grossas por hectare, ou a uma árvore a cada 100 m². No geral, foram empregados dados de 2.396 parcelas, medidas nos anos de 2008 a 2014, com idade variando de 3,0 a 21,4 anos. Desse total, 1.396 parcelas, medidas de 2011 a 2014, tiveram sua medição efetuadas com controle de árvore individual, com idade oscilando de 3,2 a 21,0 anos. O total de parcelas e/ou árvores utilizado em cada uma das etapas deste trabalho está sumarizado na Tabela 1.1.

TABELA 1.1 - PARCELAS E/OU ÁRVORES UTILIZADAS EM CADA UMA DAS ETAPAS DA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO DE POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Capítulo	Variável	Parcelas		Árvores	
		Ajuste	Validação	Ajuste	Validação
1	Sítio	2.396	-	5.100	-
1	Relação hipsométrica	1.056	569	27.102	6.775
1	Volume individual	-	-	236	60
2	Índices de Competição	1.056	79	191.223	-
3	Mortalidade	1.056	79	13.074	-
4	Projeção do diâmetro	1.056	79	96.036	29.653
4	Projeção da altura	1.056	79	85.060	29.177
5	Validação	-	300	-	-

2.3 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE SÍTIO

Para a determinação das classes de sítio, foi empregado o método baseado na relação da altura dominante e idade, a partir da definição de índices de sítio. Para isso, foi utilizado o modelo biológico de Chapman-Richards (1). O método empregado para construir as curvas de sítio foi o da curva-guia. O modelo guia (2), empregado para gerar as curvas de sítio, está apresentado a seguir.

$$h_{\text{dom}} = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 I}\right)^{\beta_2} \varepsilon_i \quad (1)$$

$$h_{\text{dom}} = S \left(\frac{1 - e^{-\hat{\beta}_1 I}}{1 - e^{-\hat{\beta}_1 I_i}} \right)^{\hat{\beta}_2} \quad (2)$$

Em que: h_{dom} = altura dominante da parcela (m); S = índice de sítio (m); I = idade (anos); I_i = idade índice (18 anos); β_i = coeficientes a serem estimados; $\hat{\beta}_i$ = coeficientes estimados; ε_i = erro aleatório do modelo.

A idade de 18 anos foi definida como a idade índice. O algoritmo empregado para obter as estimativas dos parâmetros do modelo de Chapman-Richards foi o *Rosenbrock pattern* (ROSENBROCK, 1960), uma vez que retornou valores de coeficientes mais realistas do ponto de vista biológico.

Um total de 5.100 pares de altura dominante e idade foi utilizado para a construção das curvas de sítio. Três classes de sítio foram geradas, sendo I, II e III, perfazendo os sítios de alta, média e baixa produtividade, respectivamente.

Com intuito de validar as curvas de índices de sítio geradas, foi aplicado o teste de anamorfismo ou polimorfismo, proposto por Kirby (1975). Conforme esse autor, a validade do modelo selecionado para construção das curvas de sítio é baseada em uma relação linear entre o índice de sítio e a altura dominante média em diferentes idades. Isso indica que o índice de sítio não depende da idade, mas do potencial produtivo do local. A análise gráfica dessa relação linear foi realizada para as idades de 4 a 20 anos, em intervalos bianuais. Para isso, foi necessário encontrar primeiramente o valor do índice de sítio correspondente a cada valor de h_{dom} , a partir da expressão matemática (3).

$$S = h_{dom} \left(\frac{1 - e^{-\hat{\beta}_1 I_i}}{1 - e^{-\hat{\beta}_1 I}} \right)^{\hat{\beta}_2} \quad (3)$$

Em que: h_{dom} , S , I , I_i e $\hat{\beta}_i$ conforme mencionado anteriormente.

Em seguida, a confiabilidade das curvas anamórficas foi testada verificando-se a existência de relação linear entre os índices de sítio e as alturas dominantes médias, a partir do ajuste do modelo estatístico (4) em diferentes idades.

$$S = \beta_0 + \beta_1 h_{dom} + \varepsilon_i \quad (4)$$

Em que: β_i = coeficientes a serem estimados; h_{dom} , S e ε_i conforme mencionado anteriormente.

Conforme Scolforo (2006), o esperado é que sejam obtidos valores de intercepto (β_0) e de coeficiente angular (β_1) estatisticamente iguais e diferentes de zero, respectivamente. Também, que os valores do coeficiente angular reduzam com o avanço da idade. Finalmente, que o coeficiente angular seja maior que 1 nas idades menores à idade índice; igual a 1 na idade índice; e menor que 1 nas idades acima dessa.

Além do teste de anamorfismo, foi verificado o coeficiente de variação em altura dominante média por idade e por classe de sítio. De acordo com Scolforo (1992), uma das

pressuposições básicas do anamorfismo é que esses valores sejam semelhantes em todas as idades em uma mesma classe de sítio.

2.4 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Estatísticas descritivas foram empregadas para analisar o diâmetro à altura do peito e altura total. Também, foi analisado o número de árvores e área basal por hectare. Essas análises foram realizadas para cada classe de sítio e nas idades de 6 a 18 anos, em intervalos bianuais. As estatísticas descritivas utilizadas foram os valores mínimos, médios e máximos, além do coeficiente de variação.

2.5 RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA

Para os ajustes dos modelos hipsométricos foram empregados dados de 1.625 parcelas, medidas em quatro ocasiões, de 2011 a 2014, com idades de 3,2 a 21,0 anos, totalizando 33.877 alturas medidas. Do total de árvores, 80% foram empregadas no ajuste e 20% na validação dos modelos. Tanto a seleção das árvores a compor a base de dados para o ajuste quanto para a validação dos modelos se deu de forma proporcional em relação às classes de sítio.

No sentido de se obter uma equação genérica, foram testados modelos hipsométricos, lineares e não lineares, em função de variáveis que expressam o tamanho, idade e qualidade produtiva local. Os modelos hipsométricos testados estão apresentados na Tabela 1.2.

TABELA 1.2 - MODELOS GENÉRICOS DE RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA PARA ESTIMAR ALTURA TOTAL DE POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Autor/Fonte	Modelo	Nº. Modelo
Campos e Leite (2013)	$h = \beta_0 + \beta_1 d^{-1} + \beta_2 S + \beta_3 \ln(I) + \varepsilon_i$	5
Campos e Leite (2013)	$h = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 \ln(Id) + \beta_3 I + \varepsilon_i$	6
Campos e Leite (2013)	$h = \beta_0 + \beta_1 d^{-1} + \beta_2 \ln(h_{dom}) + \varepsilon_i$	7
Nogueira (2003)	$h = \beta_0 + \beta_1 I + \beta_2 d + \beta_3 S + \varepsilon_i$	8
Nogueira (2003)	$h = e^{\beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 d^{-1} + \beta_3 \ln(I)} \varepsilon_i$	9

Em que: h = altura total (m); d = diâmetro à altura do peito (cm); S = índice de sítio (m); I = idade (anos); h_{dom} = altura dominante da parcela (m); β_i = coeficientes a serem estimados; ε_i = erro aleatório do modelo.

Para o ajuste dos modelos lineares, foi empregado o método dos mínimos quadrados ordinários. Para o modelo (9), único não linear, utilizou-se o algoritmo de Levenberg-Marquardt (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963) para obtenção de seus coeficientes.

2.6 ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS

Para a obtenção da equação volumétrica, foram utilizados dados de 296 árvores cubadas, representativas da variabilidade do diâmetro, altura e idade do povoamento. De todas as árvores cubadas, 236 foram empregadas no ajuste e o restante para validação do modelo. O volume das seções na ocasião da cubagem foi obtido pelo método de Smalian, e o volume da ponta pela aplicação da fórmula do cone (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). Em cada árvore, foram medidos os diâmetros ao longo do fuste, sendo uma medida tomada na base do fuste e as demais nas alturas de 0,7; 1,3; 2,0 m e, a partir daí, em distâncias de 2,0 m, até próximo da altura total.

Devido à sua grande aplicabilidade, com geração de resultados aceitáveis e livres de tendências (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014), o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) (10) foi utilizado para estimar o volume total com casca das árvores do povoamento em estudo. O algoritmo empregado para o ajuste desse modelo foi o de Levenberg-Marquardt (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963). O modelo está apresentado a seguir.

$$v = \beta_0 d^{\beta_1} h^{\beta_2} \varepsilon_i \quad (10)$$

Em que: v = volume total da árvore, com casca (m^3); d , h , β_i e ε_i = conforme mencionados anteriormente.

Como forma de aumentar a precisão das estimativas volumétricas, classes de idade foram consideradas para o ajuste do modelo volumétrico. Assim, três classes foram adotadas, sendo a primeira envolvendo árvores de 4 a 8 anos; a segunda de 9 a 15 anos; e a terceira de 16 a 19 anos de idade. O número de árvores cubadas em cada uma dessas classes, e também por classes de diâmetro e altura total, pode ser observado na Tabela 1.3. A amplitude usada na classe de diâmetro e altura total foi de 2 cm e 2 m, respectivamente.

TABELA 1.3 - NÚMERO DE ÁRVORES CUBADAS POR CLASSES DE IDADE, DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

MARENGO DE TELEMACO BORJA, PARANÁ																						
CI (anos)	h (m)	d (cm)																				
		6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46
1	5	6 (2)	4 (1)	(1)																		
	7	3	7 (2)	4 (1)	1	1 (2)	2															
	9		1 (1)	5 (1)	2 (1)	3 (1)	1	2	1													
	11			1	1	3	3		1 (2)	1												
	13					3	(1)	1 (1)	4	3 (1)	2											
	15							2			2 (1)	1	1	2	2							
	17										2	1		1 (1)								
2	11		1			1																
	13				2 (1)	(1)	1		2													
	15			2	1	3		3	(1)	2	2	1	1									
	17				3 (1)	1	1 (1)	1	1	2	3 (2)	(1)	2 (1)	(1)	1							
	19					1		1 (1)	2	(1)	1	1	5 (1)	1	2	2	(1)		1		1	
	21							1	1	2	2	1	(1)	2	1	2 (1)	2	2				
	23											2	2		3 (1)	3 (1)	1	1		2 (1)		
	25														(1)		1	1 (1)	1	1		
	27														1							
3	21							1		1 (1)			1		1	1	(1)	1		1		
	23								1		1	1 (1)	2 (1)	1 (1)	1	(1)	1	(2)	1	1		
	25										1			1	3 (1)	1	1 (1)	7	(1)	1		
	27												1		1	1	7	5 (2)	1	3 (1)	(1)	
	29																1		1	2 (1)	7 (2)	
	31																			1	2 (1)	
	33																					1

Em que: CI = classe de idade; d = classe de diâmetro, com amplitude de 2 cm; h = classe de altura total, com amplitude de 2 m. Os valores entre parênteses se referem ao número de árvores empregadas na validação do modelo.

2.7 AVALIAÇÃO DOS AJUSTES DOS MODELOS

As estatísticas utilizadas para avaliar os modelos lineares foram o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$) e a análise residual por meio de gráficos de distribuição (DRAPER; SMITH, 1998) e boxplots (KIERNAN; BEVILACQUA; NYLAND, 2008; HÄRKÖNEN et al., 2010). Para os modelos não lineares, foi utilizado o erro padrão da estimativa e análise gráfica residual.

Para avaliar a precisão dos modelos aplicados à base de dados selecionada para validação, foi utilizada a raiz do quadrado médio do resíduo (RQMR) (REGAZZI, 2003), dada

pela expressão $RQMR\% = 100 \times \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / n \right]^{1/2} / \bar{Y}$, em que RQMR foi calculada em

percentagem, sendo “n” o número de pares de dados, Y_i e \hat{Y}_i os valores observados e estimados, respectivamente. O nível de significância α adotado na regressão foi de 5%, assim como para a significância dos coeficientes ($p\text{-valor} \leq 0,05$).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 DETERMINAÇÃO DAS CLASSES DE SÍTIO

Após o ajuste do modelo de Chapman-Richards, a equação resultante para estimar a altura dominante foi $h_{\text{dom}} = 41,224399 \left(1 - e^{-0,061832 I}\right)^{1,156161}$, com erro padrão da estimativa (S_{yx}) igual a 9,5%. Todos os coeficientes foram significativos a 5% de significância.

Na Figura 1.1 (a) está apresentado o comportamento em altura total das árvores dominantes em relação à idade e os respectivos valores estimados, e na Figura 1.1 (b) a dispersão dos resíduos das estimativas de altura dominante em função da idade.

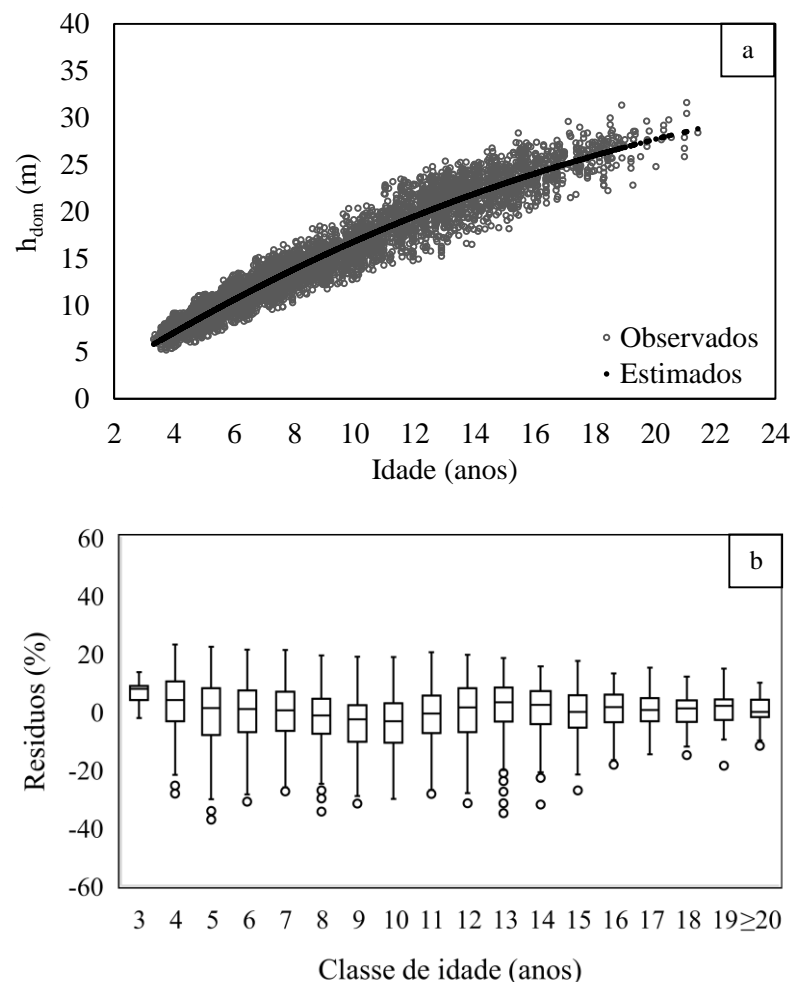


FIGURA 1.1 - VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA IDADE (a) E BOXPLOTS DOS RESÍDUOS PARA AS ESTIMATIVAS DE ALTURA DOMINANTE (b) PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Conforme a Figura 1.1, em “a”, a tendência do crescimento em altura dominante em função da idade foi explicada satisfatoriamente pela curva de regressão. Em “b” estão apresentados os Boxplots dos resíduos por classe de idade. Verifica-se que grande parte das estimativas se apresentou próxima a “zero”, indicando precisão dos valores estimados. A amplitude de variação se concentrou em maior peso entre $\pm 25\%$.

O modelo de Chapman-Richards é bastante difundido na área florestal, sendo empregado para diversas espécies, sobretudo para representar o crescimento da altura dominante. Além de sua flexibilidade em demonstrar vários tipos de tendências, possui propriedades que garantem representar satisfatoriamente o crescimento típico biológico.

Outros trabalhos que empregaram o modelo de Chapman-Richards são o de Scolforo (1992), que empregou o método da diferença algébrica para gerar curvas de índice de sítio para povoamentos desbastados de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, situados no município de Agudos, São Paulo, com idade variando de 4,08 a 28,17 anos. Machado et al. (1997) construíram curvas anamórficas de índice de sítio para bracatingais (*Mimosa scabrella* Benth.) localizados na região metropolitana de Curitiba, Paraná, empregando dados de parcelas permanentes e temporárias, com idade de 1 a 18 anos.

Tonini et al. (2001) empregaram a função de Chapman-Richards para descrever o crescimento em altura dominante em função da idade com dados de análise de tronco para povoamentos desbastados de *Pinus elliottii* Engelm., com 18 anos de idade, localizados em Piratini, Rio Grande do Sul. Téó, Bressan e Costa (2011) avaliaram a eficiência de modelos estatísticos na classificação de sítios em povoamentos desbastados de *P. taeda* com idade de 5 a 28 anos, na região de Caçador, estado de Santa Catarina. Retslaff et al. (2015) concluíram que o modelo de Chapman-Richards foi o mais adequado para construir curvas de sítio para plantios de *Eucalyptus grandis*, situados no município de Telêmaco Borba, Paraná, com idade de 2,5 a 26,5 anos, sendo os dados provenientes de parcelas permanentes e temporárias.

Foram adotadas as classes de sítio I (30,5 m), II (25,5 m) e III (20,5 m), representando os sítios de alta, média e baixa produtividade, respectivamente. Na Figura 1.2 são observadas as curvas limites das classes de sítio, assim como a distribuição das parcelas nessas classes. A variação da altura dominante observada na idade índice foi de 22,2 a 30,0 m. A linha vertical indica a idade índice de 18 anos. A intensidade maior dos dados se concentrou no sítio de produtividade média.

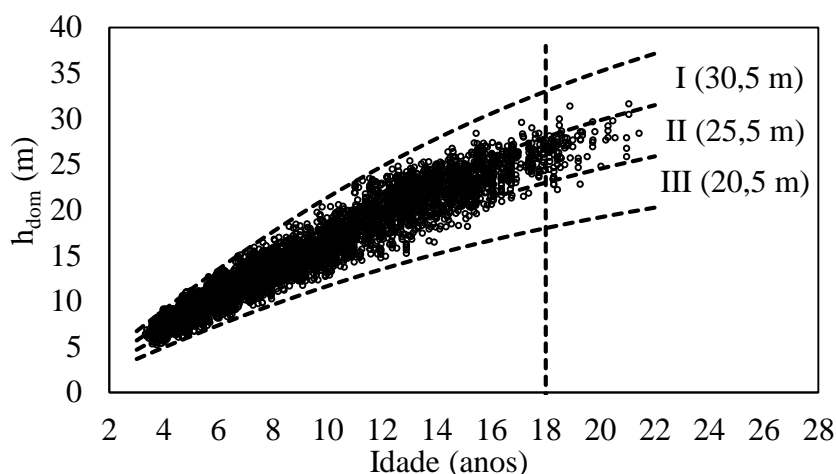


FIGURA 1.2 - VALORES OBSERVADOS DE ALTURA DOMINANTE EM FUNÇÃO DA IDADE E CURVAS LIMITES DE ÍNDICE DE SÍTIO, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Na Tabela 1.4 constam os limites de altura dominante em relação à idade e às classes de sítios I, II e III sendo, respectivamente, alta, média e baixa produtividade. A amplitude da classe foi de 5 m.

TABELA 1.4 - LIMITES DE ALTURA DOMINANTE POR IDADE E CLASSES DE SÍTIO I, II E III, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Idade (anos)	Sítio I (30,5 m)		Sítio II (25,5 m)		Sítio III (20,5 m)	
	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.	Lim. Inf.	Lim. Sup.
3	5,7	6,6	4,7	5,6	3,6	4,6
4	7,7	8,9	6,3	7,6	4,9	6,2
5	9,6	11,2	7,9	9,5	6,1	7,8
6	11,4	13,4	9,4	11,3	7,3	9,3
7	13,2	15,5	10,9	13,1	8,4	10,8
8	14,9	17,5	12,3	14,8	9,5	12,2
9	16,6	19,4	13,6	16,5	10,6	13,5
10	18,1	21,2	14,9	18,0	11,6	14,8
11	19,6	23,0	16,1	19,5	12,5	16,0
12	21,0	24,7	17,3	20,9	13,4	17,2
13	22,4	26,2	18,4	22,3	14,3	18,3
14	23,6	27,7	19,4	23,5	15,1	19,3
15	24,8	29,2	20,4	24,7	15,9	20,3
16	26,0	30,5	21,4	25,9	16,6	21,3
17	27,1	31,8	22,3	27,0	17,3	22,2
18	28,1	33,0	23,1	28,0	18,0	23,0
19	29,1	34,1	23,9	29,0	18,6	23,8
20	30,0	35,2	24,7	29,9	19,2	24,6
21	30,9	36,3	25,4	30,8	19,8	25,3
22	31,7	37,2	26,0	31,6	20,3	25,9

Em que: Lim. Inf. e Lim. Sup. = limite inferior e superior da classe de sítio, respectivamente.

Com a finalidade de verificar o anamorfismo das curvas de sítio, conforme consta em Kirby (1975), foi ajustada um modelo linear simples entre o índice de sítio e a altura dominante média nas diferentes idades. Na Tabela 1.5 estão apresentados os coeficientes estimados e seus respectivos p-valores. Para o coeficiente β_0 (intercepto), os p-valores foram todos acima do nível de significância selecionado ($p \leq 0,05$), indicando que, mesmo esse coeficiente admitindo valor diferente de zero, estatisticamente foi nulo. Dessa forma, a hipótese de nulidade da regressão linear ($\beta_0 = 0$) não foi rejeitada.

Para o coeficiente β_1 (coeficiente angular), os p-valores confirmaram a rejeição da hipótese de nulidade para todos os casos. O coeficiente β_1 assumiu valores maiores que 1, igual a 1 e menor que 1, nas idades menores, igual e maiores à idade índice, respectivamente. Nas diversas situações, o coeficiente de determinação (R^2) admitiu valores bem próximos a 1.

TABELA 1.5 - COEFICIENTES ESTIMADOS E SEUS RESPECTIVOS P-VALORES DA RELAÇÃO ENTRE O ÍNDICE DE SÍTIO E A ALTURA DOMINANTE MÉDIA, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Idade	Coeficientes		p-valor		R^2
	β_0	β_1	β_0	β_1	
4	0,8101	3,4168	0,61	0,00	0,99
6	0,0072	2,4400	0,96	0,00	1,00
8	0,2025	1,8584	0,27	0,00	1,00
10	0,1575	1,5361	0,52	0,00	1,00
12	0,3080	1,3176	0,36	0,00	1,00
14	0,0927	1,1818	0,36	0,00	1,00
16	0,1245	1,0739	0,17	0,00	1,00
18	-0,0701	1,0012	0,83	0,00	1,00
20	-0,0849	0,9490	0,44	0,00	1,00

Em que: R^2 = coeficiente de determinação.

Na Figura 1.3 estão apresentadas as relações lineares entre o índice de sítio e a altura dominante, para as idades de 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 e 20 anos. Percebe-se que todas essas relações tendem a passar na origem, assumindo valores de intercepto estatisticamente igual a zero. Ainda, ocorreu diminuição da inclinação das retas com o aumento da idade.

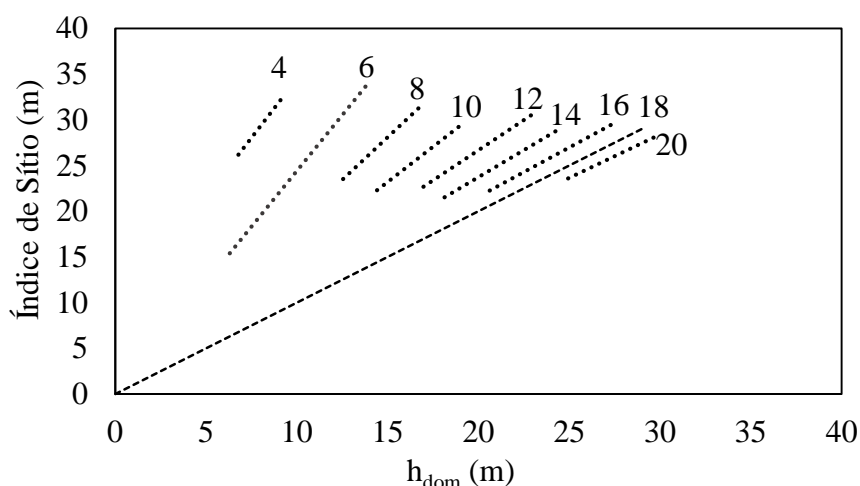


FIGURA 1.3 - RELAÇÃO LINEAR ENTRE O ÍNDICE DE SÍTIO E ALTURA DOMINANTE PARA DIFERENTES IDADES, EM POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

A tendência de redução dos valores dos coeficientes angulares é esperada. Nas classes iniciais de idade, a amplitude entre as curvas de sítio é menor, de modo que pequenas alterações na altura dominante podem representar migrações entre as classes de sítio. Por outro lado, em idades mais avançadas, a distinção dessas classes apresenta-se mais evidente, sendo a amplitude das curvas maior. Nesse caso, a sensibilidade de mudança de classe de sítio às variações na altura dominante é mínima.

Na Tabela 1.6 são apresentados os valores de coeficiente de variação para as idades de 5 a 16 anos e em cada classe de sítio. Não foram consideradas idades acima de 16 anos pois, sobretudo nas classes de sítio I (30,5 m) e III (20,5 m), não haviam dados suficientes para obtenção do desvio padrão e, conseqüentemente, do coeficiente de variação. Os coeficientes de variação percentual foram baixos em todas as situações. Esses valores comprovam o anamorfismo das curvas de índice de sítio construídas, visto que os mesmos foram semelhantes para as diversas idades para uma mesma classe de sítio, em comparação com resultados de outros trabalhos disponíveis na literatura.

TABELA 1.6 - COEFICIENTES DE VARIAÇÃO EM ALTURA DOMINANTE POR IDADE E CLASSE DE SÍTIO, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Sítio	Idade (anos)											
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I (30,5 m)	6,0	4,9	5,8	2,4	4,3	1,9	1,9	3,0	0,5	1,1	1,6	1,9
II (25,5 m)	4,7	6,2	5,7	5,1	4,2	6,5	5,9	5,8	5,2	6,5	2,7	5,7
III (20,5 m)	3,9	3,9	0,9	5,3	6,4	3,7	4,5	3,7	3,7	3,1	2,4	1,4

Resultados semelhantes foram obtidos por Scolforo (1992), o qual avaliou o coeficiente de variação para diferentes idades para a classe de sítio 11, para povoamentos desbastados de *P. caribaea*, estabelecidos no município de Agudos, São Paulo. Téó, Bressan e Costa (2011) também analisaram o coeficiente de variação percentual para o sítio mais produtivo, em povoamentos desbastados de *P. taeda* da região de Caçador, estado de Santa Catarina. Scavinski (2014) realizou o teste de anamorfismo ou polimorfismo para *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden de primeira rotação, com idade oscilando de 12 a 96 meses. Nesses trabalhos, as curvas de índices de sítio foram consideradas anamórficas.

3.2 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

Na Tabela 1.7 está apresentada a distribuição das 1.356 parcelas conforme as classes de índice de sítio e número de medições do inventário florestal. A maioria das parcelas possui somente duas medições, equivalente a 89% dos dados. Houve apenas uma parcela medida em quatro ocasiões, no período de 2011 a 2014.

TABELA 1.7 - DISTRIBUIÇÃO DAS PARCELAS POR CLASSE DE SÍTIO E POR NÚMERO DE MEDIÇÕES, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Sítio	Número de Medições		
	2	3	4
I (30,5 m)	254	50	-
II (25,5 m)	820	90	1
III (20,5 m)	135	6	-
Total	1.209	146	1

Na Tabela 1.8 são apresentadas as estatísticas descritivas das 1.356 parcelas, para as principais variáveis dendrométricas e do povoamento. É visível o efeito do sítio no crescimento em diâmetro à altura do peito, altura total e área basal por hectare, para uma mesma idade, em que valores mais elevados são observados no sítio mais produtivo.

Em geral, percebe-se aumento do coeficiente de variação à medida que se avança nas classes de sítio, indicando maior variabilidade das variáveis analisadas nos sítios menos produtivos. A inexistência de valores de coeficiente de variação para o número de árvores e área basal por hectare é devido à presença de apenas uma parcela na classe de sítio III, aos 18 anos de idade.

TABELA 1.8 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS, POR CLASSE DE SÍTIO E IDADE, PARA AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E DO POVOAMENTO DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Sítio (m)	Idade (anos)	d (cm)				h (m)				N (ha)				G (m ² .ha ⁻¹)			
		Min	Med	Max	CV%	Min	Med	Max	CV%	Min	Med	Max	CV%	Min	Med	Max	CV%
I (30,5 m)	6	6,1	16,4	23,4	20,6	8,6	11,1	12,7	10,5	716	1.462	1.791	11,6	14,0	32,2	45,7	16,0
	8	7,2	18,7	28,1	23,5	11,4	14,4	16,5	10,2	730	1.461	1.619	14,6	19,4	39,2	51,4	16,7
	10	8,4	20,7	31,2	23,1	13,1	17,0	19,3	10,0	1.147	1.460	1.650	8,0	41,4	51,5	60,6	9,7
	12	9,6	22,3	33,8	23,1	16,2	20,8	23,3	9,3	773	1.380	1.617	11,7	43,8	56,5	67,0	11,0
	14	12,3	24,3	36,2	21,6	19,9	23,4	25,6	6,7	733	1.296	1.440	16,4	43,2	57,4	68,7	12,1
	16	13,9	24,7	36,5	19,3	21,7	25,0	27,1	6,2	1.003	1.255	1.434	9,6	45,9	62,4	68,0	8,2
	18	15,9	25,9	38,7	17,8	24,1	27,7	29,7	5,7	1.154	1.202	1.239	3,2	64,0	65,3	66,4	1,6
II (25,5 m)	6	6,1	15,8	23,1	21,4	7,6	9,9	11,5	11,1	638	1.435	1.845	12,1	13,6	29,7	44,0	17,9
	8	6,8	18,4	27,6	23,5	10,0	12,9	14,8	10,5	732	1.340	1.687	13,9	15,9	37,4	51,0	15,6
	10	7,6	19,9	30,0	24,0	12,6	15,7	17,6	9,4	738	1.334	1.633	15,0	27,7	43,8	60,6	15,6
	12	9,0	21,1	32,1	23,2	15,0	18,5	20,9	9,1	893	1.323	1.600	13,2	32,0	48,9	64,1	15,8
	14	11,0	22,6	33,2	20,8	16,8	21,0	23,5	8,9	796	1.268	1.488	11,4	38,7	53,0	72,9	14,6
	16	12,3	23,8	34,9	20,2	19,1	22,9	25,1	7,4	947	1.253	1.712	11,7	42,7	58,2	76,4	14,2
	18	14,5	25,3	36,3	18,5	22,2	25,4	27,4	5,9	912	1.203	1.394	9,8	39,3	62,6	75,6	11,9
III (20,5 m)	6	5,6	14,4	21,4	22,7	6,0	8,4	10,1	13,8	797	1.361	1.655	18,3	7,1	23,5	38,0	26,9
	8	6,6	16,9	25,6	23,3	8,3	10,9	12,8	11,5	816	1.214	1.508	17,7	17,3	28,6	38,2	15,0
	10	6,9	18,2	28,2	25,0	10,8	13,6	15,6	10,2	640	1.211	1.574	21,5	20,0	32,9	41,1	16,1
	12	7,9	19,1	29,9	23,3	12,1	15,8	18,2	10,7	920	1.123	1.558	17,7	26,1	36,9	46,6	19,5
	14	10,0	21,8	30,4	22,7	13,6	17,4	19,8	9,4	753	1.028	1.339	18,9	28,4	40,3	49,4	17,7
	16	10,4	22,0	30,9	19,0	16,9	19,3	21,7	8,1	916	1.019	1.123	14,4	42,8	44,0	45,3	4,2
	18	11,8	22,1	31,2	12,4	19,0	21,5	22,9	5,0	1.001	1.001	1.001	-	50,0	50,0	50,0	-

Em que: d = diâmetro à altura do peito; h = altura total; N = número de árvores por hectare; G = área basal; CV% = coeficiente de variação; Min, Med e Max = valores mínimos, médios e máximos, respectivamente.

Na Tabela 1.8 observa-se ainda que, em relação ao número de árvores por hectare, os valores médios foram mais elevados nos sítios mais produtivos, nas diferentes idades. Aumentos no número mínimo e máximo de árvores por hectare, para algumas idades, podem ter sido ocasionados pela descontinuidade das medições das parcelas permanentes, pois a maior parte possui apenas duas medições, conforme mencionado anteriormente.

3.3 RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA

Os resultados dos ajustes dos modelos hipsométricos estão apresentados na Tabela 1.9. Os modelos ajustados que mais se destacaram foram o 9, 8 e 6, com maiores valores de coeficiente de determinação e menores erros padrões da estimativa, nessa ordem. Os mesmos modelos tiveram melhor desempenho para a base de dados para validação conforme os valores da estatística RQMR, sendo que o modelo 9 propiciou as melhores estatísticas de avaliação. Em todos os casos, os coeficientes foram significativos a 5% de significância ($p\text{-valor} \leq 0,05$).

TABELA 1.9 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR ALTURA TOTAL EM POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Modelo	Coeficientes				Ajuste		Validação
	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{aj}	$S_{yx}\%$	RQMR%
5	-17,02535*	-56,28039*	0,39849*	11,15597*	0,92	10,77	9,70
6	-22,75307*	0,33960*	4,23441*	0,69650*	0,94	8,86	7,67
7	1,18560*	-7,29201*	0,70459*	-	0,91	11,04	12,25
8	-8,68118*	1,08035*	0,25721*	0,29171*	0,94	8,83	7,54
9	0,72145*	0,02395*	-5,90105*	0,72669*	-	8,18	6,70

Em que: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa percentual; RQMR% = raiz do quadrado médio do resíduo percentual; β_i = coeficientes estimados; * coeficientes significativos a 5%.

Na Figura 1.4 estão apresentados os Boxplots de resíduos por classe de diâmetro para os modelos 8 e 9, os quais obtiveram melhor desempenho. Em ambos os modelos, podem ser observados valores extremos (*outliers*), sendo em menor número para o modelo 9. A distribuição residual para o modelo 8 atingiu maiores amplitudes. Esse modelo apresentou tendência em superestimar a altura total para as menores classes diamétricas. Por outro lado, o modelo 9 apresentou tendência em subestimar essa variável nas classes iniciais de diâmetro, porém, em menor grau. Sendo assim, o modelo 9 (NOGUEIRA, 2003) foi o mais adequado para estimar a altura total das árvores do povoamento em estudo, dado pela equação

$$h = e^{0,72145+0,02395S-5,90105d^{-1}+0,72669 \ln I}$$

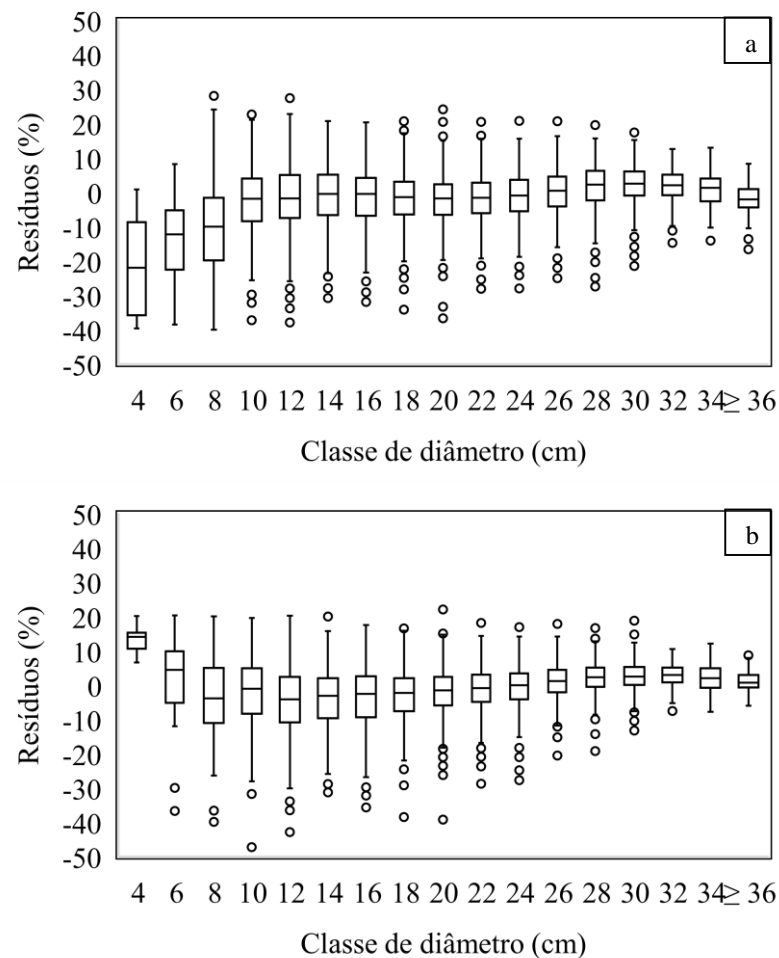


FIGURA 1.4 - BOXPLOTS DOS RESÍDUOS PARA ESTIMATIVA DE ALTURA TOTAL PARA OS MODELOS 8 (a) E 9 (b), PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

3.4 ESTIMATIVAS VOLUMÉTRICAS

Na Tabela 1.10 estão apresentados os coeficientes e a estatística de avaliação para o ajuste do modelo volumétrico. Em todas as situações, os coeficientes foram significativos a 5% de significância ($p\text{-valor} \leq 0,05$). O melhor resultado de S_{yx} foi para a classe 3 (16 a 19 anos).

TABELA 1.10 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DO MODELO UTILIZADO PARA ESTIMAR VOLUME TOTAL COM CASCA PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Classe de Idade	Coeficientes			Ajuste	Validação
	β_0	β_1	β_2	$S_{yx}\%$	RQMR%
1	0,00008*	1,67183*	1,05996*	8,94	8,87
2	0,00004*	1,84164*	1,17087*	10,10	6,76
3	0,00015*	1,81772*	0,75817*	8,18	6,40

Em que: $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa percentual; RQMR% = raiz do quadrado médio do resíduo percentual; β_i = coeficientes estimados; * coeficientes significativos a 5% de significância.

Observando-se os gráficos de resíduos, houve pequena tendência em subestimar o volume, principalmente para as árvores da classe de idade 1 (FIGURA 1.5). Contudo, essa tendência foi bem sutil, se situando abaixo de 11%. Assim, o modelo foi considerado adequado. O modelo de Schumacher e Hall também foi empregado em muitos trabalhos, para várias espécies e locais, como pode ser visto em Figueiredo Filho et al. (2014).

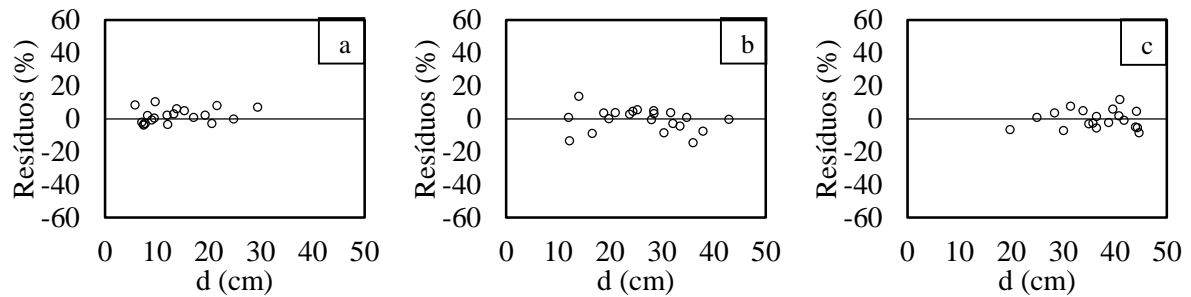


FIGURA 1.5 - DISPERSÃO RESIDUAL PARA ESTIMATIVA DE VOLUME TOTAL COM CASCA PARA AS CLASSES DE IDADE 1 (a), 2 (b) E 3 (c), PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda*, SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

4 CONCLUSÕES

O modelo biológico de Chapman-Richards apresentou estatísticas adequadas para estimar a altura dominante, permitindo construir as curvas de índice de sítio para povoamentos de *P. taeda* da região de Telêmaco Borba, Paraná.

Conforme a dispersão dos valores de altura dominante em função da idade, foram definidas três classes de sítio.

A partir dos testes de anamorfismo e coeficiente de variação, pode-se inferir que as curvas de sítio geradas seguem o padrão anamórfico.

O modelo hipsométrico não linear foi o mais adequado para estimar a altura total, sendo em função da idade, índice de sítio e diâmetro à altura do peito.

O modelo volumétrico de Schumacher e Hall apresentou estatísticas aceitáveis para estimar os volumes totais com casca das árvores, em todas as classes de idade adotadas.

REFERÊNCIAS

- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. Oxford: Pergamon Press. 1970. 506p.
- BELTRÁN, H. A.; CHAUCARD, L. M.; PASTUR, G. M. Curvas preliminares de índice de sitio para bosques puros y mixtos de *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua* en la Patagonia Argentina. **Bosque**, v.36, n.2, p.275-285, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002015000200013>
- BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v.37, n.4, p.639-645, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000400007>
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 605p.
- CASTRO, R. V. O.; CUNHA, A. B.; SILVA, L. V.; LEITE, H. G.; SILVA, A. A. L. Modelagem do crescimento e produção para um povoamento de *Eucalyptus* utilizando dois métodos para quantificação do índice de local. **Scientia Forestalis**, v.43, n.105, p.83-90, 2015.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 706p.
- FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; MIRANDA, R. O. V.; RETSLAFF, F. A. S. **Compêndio de equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões fitogeográficas do Brasil**. Curitiba: Os Autores, 2014. 306p.
- FIGURA, M. A. **A distribuição de Weibull na descrição da estrutura diamétrica de *Eucalyptus grandis*: Um enfoque sobre o método dos momentos**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- HÄRKÖNEN, S.; MÄKINEN, A.; TOKOLA, T.; RASINMÄKI, J.; KALLIOVIRTA, J. Evaluation of forest growth simulators with permanent sample plot data from Finland. **Forest Ecology and Management**, v.259, n.3, p.573-582, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.015>
- HIGUCHI, N. Usando o método "Jackknife" para estimar volume de madeira da Floresta Amazônica. **Atas da 24ª Reunião regional da associação brasileira de estatística, 12ª Semana do estatístico**. Manaus. p.42-56, 1992.
- KIERNAN, D. H.; BEVILACQUA, E.; NYLAND, R. D. Individual-tree diameter growth model for sugar maple trees in uneven-aged northern hardwood stands under selection system. **Forest Ecology and Management**, v.256, n.9, p.1.579-1.586, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.015>
- KIRBY, C. L. **Site index equations for lodgepole pine and white pine in Alberta**. Edmonton: Northern Forest Research Centre, 1975. 12p. (Inform. Report NORX-142).

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. **Quarterly Journal of Applied Mathematics**, v.2, n.2, p.164-168, 1944.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava, Paraná: Editora Unicentro, 2009. 316p.

MACHADO, S. A.; OLIVEIRA, E. B.; CARPANEZZI, A. A.; BARTOSZECK, A. C. P. S. Classificação de sítio para bracatingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n.35, p.21-37, 1997.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v.11, n.2, p.431-441, 1963. <http://dx.doi.org/10.1137/0111030>

MENDONÇA, A. R.; CORANDIN, C. M.; PACHECO, G. R.; VIEIRA, G. C.; ARAÚJO, M. S.; INTERAMNENSE, M. T. Modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. hondurensis. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.35, n.81, p.47-54, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.4336/2015.pfb.35.81.710>

NOGUEIRA, G. S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de Eucalyptus sp. e de Tectona grandis submetidas a desbaste**. 126 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

NUNES, J. R. S.; FIER, I. S. N.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Desempenho da fórmula de Monte Alegre (FMA) e da fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA+) no distrito florestal de Monte Alegre. **Floresta**, Curitiba, v.40, n.2, p.319-326, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufv.v40i2.17827>

PEGO, M. F. F.; ASSIS, A. L.; CABACINHA, C. D. Classificação de sítios florestais em povoamentos de eucalipto na microrregião de Salinas, Minas Gerais. **Enciclopédia Biosfera**, v.11, n.21, p.534-542, 2015.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, v.50, n.287, p.9-26, 2003.

RETSLAFF, F. A. S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; BERNETT, L. G.; FIGURA, M. A. Curvas de sítio e relações hipsométricas para *Eucalyptus grandis* na região dos Campos Gerais, Paraná. **Revista Cerne**, v.21, n.2, p.219-225, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201521021349>

RIBEIRO, A.; FERRAZ FILHO, A. C.; MELLO, J. M.; FERREIRA, M. Z.; LISBOA, P. M. M.; SCOLFORO, J. R. S. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, v.16, n.1, p.22-31, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602010000100003>

ROSENBROCK, H. H. An automatic method for finding the greatest or least value of a function. **The Computer Journal**, v.3, n.3, p.175-184, 1960. <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/3.3.175>

SCAVINSKI, V. **Projeção da produção utilizando curvas de sítio anamórficas e polimórficas para plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden.** 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati, 2014.

SCHNEIDER, P. R. **Introdução ao Manejo Florestal.** Santa Maria, UFSM/CEPEF-FATEC, 1993. 348p.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal:** modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: FAEPE–UFLA, 2006. 393p.

SCOLFORO, J. R. S. Curvas de índice de sítio para *Pinus caribaea* var.hondurensis. **IPEF**, v.45, p.40-47, 1992.

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, v.18, n.12, p.59-173, 1988. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v18i12.6391>

SELLE, G. L.; PAULESKI, D. T.; BRAZ, E. M. **Como classificar sítios florestais através da altura dominante do povoamento.** Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 46p. (Documentos, n. 166).

SILVA, J. N. M. **The behavior of the tropical rain forest of the Brazilian Amazon after logging.** 304 f. Thesis (PhD). Oxford Forestry Institute, Michaelmas Term, 1989.

SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, Oxford, v.81, n.1, p.13-31, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1093/forestry/cpm041>

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal.** 2ª ed. Viçosa: Ed. UFV, 2011. 272p.

TÉO, S. J.; BRESSAN, D. R.; COSTA, R. H. Uso de modelos estatísticos para classificação de sítios em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Caçador, SC. **Revista Floresta**, v.41, n.1, p. 179-188, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v41i1.21201>

THIERSCH, C. R.; ANDRADE, M. G.; MOREIRA, M. F. B.; LOIBEL, S. Estimativa da relação hipsométrica em clones de *Eucalyptus* sp. com o modelo de Curtis ajustado por métodos bayesianos empíricos. **Revista Árvore**, v.37, n.1, p.1-8, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622013000100001>

TONINI, H.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SPATHELF, P. Crescimento em altura de *Pinus elliottii* Engelm., na região de Piratini no Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, v.31, n.3, p.417-423, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782001000300008>

TONINI, H.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Curvas de índice de sítio para povoamentos clonais de *Eucalyptus Saligna* Smith para a Depressão Central e Serra do Sudeste, Rio Grande Do Sul. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, P.27-43, 2006.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield:** Applications to Mixed Tropical Forest. Wallingford: CAB INTERNATIONAL, 1994. 312p.

CAPÍTULO II

ÍNDICES DE COMPETIÇÃO PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar índices de competição independentes da distância para povoamentos de pinus. Os dados foram provenientes de parcelas permanentes de povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L., localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná, com idade de 3,2 a 21,0 anos. Foram avaliados 8 índices de competição, usualmente encontrados na literatura. Para avaliar o desempenho, foi utilizada uma matriz de correlação de Spearman entre os índices de competição com variáveis dimensionais e do povoamento. Além disso, para cada classe de sítio, foi analisada a tendência média dos índices de competição por classe de diâmetro e idade. Os resultados demonstraram que não houve um único índice que foi o mais correlacionado com todas as variáveis. Para as variáveis diâmetro, altura total e probabilidade de mortalidade, os índices mais correlacionados foram o de Glover e Hool, Lorimer e Stage, respectivamente. As correlações obtidas entre os índices de competição e o incremento em diâmetro e em altura foram inferiores às aquelas obtidas para o diâmetro e altura, sugerindo o emprego de modelos de produção ao invés de modelos de incremento, para estimar o diâmetro e altura total em idades futuras. Os índices de competição demonstraram satisfatoriamente o comportamento médio da competição das árvores, em relação à idade e para as três classes de sítio.

Palavras-chave: Competição; índices independentes da distância; correlação de Spearman; modelo de árvore individual.

CHAPTER II

COMPETITION INDICES FOR INDIVIDUAL *Pinus taeda* L. TREES

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate distance-independent competition indices for pine stands. Data were obtained from permanent plots unthinned stands of *Pinus taeda* L., located in the region of Telêmaco Borba, State of Parana, Brazil, aged from 3.2 to 21.0 years. We used 8 competition indices, usually found in the literature. To evaluate the performance, Spearman's correlation matrix was applied between the competition indices with dimensional and stand variables. In addition, the average trend of the competition indices by diameter and age class were analyzed by site class. The results showed that there was not an only index that had the highest correlation values for all variables. For the variables diameter, total height and mortality probability, the most correlated indices were Glover and Hool, Lorimer, and Stage, respectively. The correlations between the competition indices and the diameter and height increment were lower than those obtained between such indices and diameter and height, suggesting us that the use of production models rather than increment models to estimate the diameter and total height in future ages. The competition indices demonstrated properly the average trend of the tree competitions, in relation to the age and the three site classes.

Keywords: Competition; distance-independent indices; Spearman's correlation; individual-tree model.

1 INTRODUÇÃO

A competição é um processo espacial em que o desempenho de qualquer árvore individual depende de sua própria capacidade em adquirir recursos essenciais de crescimento (MÄKINEN, 1997). Pode-se dizer que as árvores estão em competição direta entre si quando a disponibilidade de recursos em um povoamento florestal é inferior ao exigido para o crescimento ideal das mesmas (PRETZSCH, 2009).

Embora existam distinções conceituais de competição, uma das mais usuais é aquela em que as árvores competem por recursos acima e abaixo da superfície do solo. Enquanto a primeira se refere principalmente à competição por luz, a segunda diz respeito à aquisição de água e nutrientes do solo (WEISKITTEL et al., 2011). Os mesmos autores afirmam que existem dois outros tipos de competição geralmente diferenciados na área florestal com respeito às espécies competidoras e à simetria das interações competitivas. Assim, competição intraespecífica é aquela entre indivíduos da mesma espécie, enquanto interespecífica é aquela entre indivíduos de espécies diferentes.

O efeito da competição é normalmente expresso por uma formulação matemática, comumente referida como "índice de competição", representando quanto cada árvore é afetada por sua vizinhança. Funções usadas para quantificar a competição variam de formulações simples, expressando a posição hierárquica da árvore dentro do povoamento ou parcela, até índices mais complexos que expressam o tamanho, distância e o número de árvores vizinhas (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Dependendo da especificação matemática, os índices de competição assumem implicitamente competição assimétrica ou simétrica dos recursos entre árvores vizinhas. O conceito básico de assimetria competitiva é que plantas maiores têm vantagem sobre as menores. Da mesma forma, a competição simétrica implica que os efeitos competitivos de indivíduos maiores e menores são, de certo modo, iguais (WEINER, 1990). Índices que não consideram a distância entre árvores, baseados naquelas maiores à árvore-objeto, assumem implicitamente competição assimétrica, refletindo, principalmente, a competição por luz (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Grande parte dos índices de competição descritos na literatura podem ser divididos em independentes e dependentes da distância (MUNRO, 1974). Os primeiros não utilizam informação espacial, mas, sim, sobre o tamanho da árvore e número dentro de uma determinada área; e os dependentes da distância que, além do tamanho e número, incorporam as localizações relativas de árvores vizinhas dentro da área (CONTRERAS; AFFLECK; CHUNG, 2011).

Existem também os índices semi-independentes, desenvolvidos para parcelas circulares, sendo espacialmente restritos às árvores mais próximas da árvore-objeto (STAGE; LEDERMANN, 2008).

Índices independente da distância não exigem as coordenadas das árvores, pois representam funções simples de variáveis em nível de povoamento e/ou dimensões da árvore-objeto, em relação ao valor médio ou máximo para o povoamento (BURKHART; TOMÉ, 2012). As variáveis independentes podem ser em nível de povoamento, variáveis que descrevem o potencial de crescimento da árvore individual, ou uma combinação de ambas (LAAR; AKÇA, 2007).

Vários índices de competição dependentes e independentes da distância foram propostos, estudados e comparados (CURTO, 2015). Esses índices são utilizados como uma das variáveis preditoras em modelos de crescimento de árvores individuais.

Geralmente, a performance desses índices em modelos de crescimento e produção é avaliada a partir de sua correlação com determinada característica de interesse, como o incremento em diâmetro, área basal ou altura (DANIELS; BURKHART; CLASON, 1986; RADTKE; WESTFALL; BURKHART, 2003; BURKHART; TOMÉ, 2012), pela redução no erro do modelo preditivo quando se insere o índice de competição (WIMBERLY; BARE, 1996), como na estimativa dos incrementos diamétrico e hipsométrico, e na mortalidade de árvores do povoamento.

Historicamente, os índices de competição foram desenvolvidos para prever o crescimento em povoamentos equiâneos monoespecíficos (DANIELS, 1976; HEGYI, 1974; LORIMER, 1983). Apesar dos avanços obtidos, não há um consenso sobre a superioridade de algum, uma vez que a habilidade preditiva varia conforme a espécie (TONINI, 2007) e condições do povoamento em estudo (CURTO, 2015).

Pretzsch (2009) afirmou que, para povoamentos homogêneos, tanto modelos dependentes quanto independentes da distância estimam o crescimento do povoamento com igual acurácia. Daniels (1976) e Martin e Ek (1984) afirmaram que a maior parte dos trabalhos que evidenciaram esse fato procederam de povoamentos. Daniels, Burkhardt e Clason (1986) compararam vários índices de competição para a predição do crescimento de árvores de *P. taeda*, localizados no estado americano da Luisiana. Os melhores índices dependentes da distância mostraram pouca ou nenhuma vantagem em relação aos melhores índices independentes de distância, tanto na correlação simples como na múltipla. Linkevicius et al. (2014) não encontraram diferenças entre índices dependentes e independentes da distância para explicar o crescimento em altura em árvores individuais de *Pinus sylvestris* L. na Lituânia.

Os principais índices de competição empregados na modelagem de árvores individuais podem ser encontrados em Davis e Johnson (1987), Biging e Dobbertin (1995), Prodan et al. (1997) e Soares e Tomé (1999). E mais recentemente, nos trabalhos de Martins (2011), Castro (2012) e Curto (2015). Conforme Roitman (2011), índices de competição têm sido aplicados com sucesso em formações que possuem condições mais controladas, como espaçamento, idade e espécie. No Brasil, tem-se como exemplos os trabalhos de Martins et al. (2011) e Castro (2011) para clones de eucalipto, e Chassot et al. (2011) e Curto (2015) para araucária.

No entanto, há carência de trabalhos que abordam a condição competitiva de espécies do gênero *Pinus* no país. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar índices de competição independentes da distância para povoamentos de *P. taeda*, situados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS

As características da área, a procedência e as informações dos dados empregados nesta pesquisa e estatísticas descritivas para as principais variáveis dendrométricas e do povoamento estão apresentadas no capítulo I.

As classes de sítio foram definidas no capítulo I, empregando-se o método da curva-guia e o modelo de Chapman-Richards, considerando uma idade índice de 18 anos, cuja equação resultante foi $h_{\text{dom}} = 41,224399(1 - e^{-0,061832 I})^{1,156161}$, com erro padrão da estimativa percentual (S_{yx}) igual a 9,5%, em que h_{dom} e I são a altura dominante (m) e idade (anos), respectivamente. Foram consideradas três classes de sítio, sendo a classe I (30,5 m) compreendendo alturas dominantes na idade índice de 28,1 a 33,0 m; a segunda classe (25,5 m) englobando alturas dominantes entre 23,1 a 28,0 m; e a classe III (20,5 m) envolvendo alturas dominantes de 18,0 a 23,0 m, representando as classes de produtividade alta, média e baixa, respectivamente.

Para a estimativa das alturas totais das árvores das parcelas foi utilizado o modelo hipsométrico genérico $h = e^{0,72145+0,02395S-5,90105d^{-1}+0,72669\ln I}$, com S_{yx} igual a 6,7%, ajustado no capítulo I, em que h é a altura total (m), S o índice de sítio (m), d e I como descritos anteriormente.

2.2 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO

Para analisar o status competitivo das árvores do povoamento de *P. taeda*, foram calculados e comparados os índices de competição independentes da distância exibidos na Tabela 2.1. As árvores competidoras à árvore-objeto foram consideradas como sendo as demais árvores integrantes da parcela. Entende-se como árvore-objeto aquela para a qual se está calculando o índice de competição. Assim, todas as árvores das parcelas, em algum momento, representam a árvore-objeto, uma vez que os índices são calculados para cada uma.

TABELA 2.1 - ÍNDICES DE COMPETIÇÃO INDEPENDENTES DA DISTÂNCIA AVALIADOS PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DE POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Nº.	Autor/Fonte	Formulação	Interpretação
IC.1	Stage (1973) – BAI (<i>Basal Area Index</i>)	$(d_i q^{-1})^2$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Ou, quanto menor o diâmetro da árvore <i>i</i> , maior é a competição sobre a mesma.
IC.2	Stage (1973) – BAL (<i>Basal Area Larger</i>)	$\sum_{i=1}^n g_i$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Quanto menor o número de árvores que possuem área basal maior que a árvore <i>i</i> , menor é a competição sobre a mesma.
IC.3		$(d_i \bar{d}^{-1})^2$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Ou, quanto mais o diâmetro da árvore <i>i</i> se distancia do diâmetro médio da parcela, para menos, maior é a competição sobre a mesma.
IC.4	Daniels, Burkhardt e Clason (1986) – Modificações do índice de Glover e Hool (1979)	$h_i \bar{h}^{-1}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Ou, quanto mais a altura da árvore <i>i</i> se distancia da altura média da parcela, para menos, maior é a competição sobre a mesma.
IC.5		$(d_i^2 h_i)(\bar{d}^2 \bar{h})^{-1}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Ou, quanto mais o diâmetro e altura da árvore <i>i</i> se distanciam do diâmetro e altura médios da parcela, para menos, maior é a competição sobre a mesma.
IC.6	Lorimer (1983)	$\sum_{j=1}^n d_j d_i^{-1}$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Afetado pelo número de árvores competidoras, pois quanto maior o número de competidoras, maior é a competição.
IC.7	Tomé e Burkhardt (1989)	$d_i d_{\max}^{-1}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Ou, quanto maior o diâmetro da árvore <i>i</i> , menor a competição sobre a mesma. Esse índice assume valor máximo de 1, na ocasião da árvore <i>i</i> for aquela de diâmetro máximo.
IC.8		$d_i d_{\text{dom}}^{-1}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore <i>i</i> . Ou, quanto maior o diâmetro da árvore <i>i</i> , menor a competição sobre a mesma.

Em que: d_i = diâmetro à altura do peito da árvore-objeto (cm); d_j = diâmetro à altura do peito das árvores competidoras (cm); d_{\max} = diâmetro à altura do peito máximo da unidade amostral (cm); d_{dom} = diâmetro dominante, definido como o diâmetro quadrático das árvores dominantes da unidade amostral (cm); \bar{d} = média aritmética dos diâmetros à altura do peito das árvores da unidade amostral (cm); q = diâmetro quadrático das árvores da unidade amostral (cm); g_i = área transversal das árvores maiores à árvore-objeto (m^2); h_i = altura da árvore-objeto (m); \bar{h} = média aritmética da altura das árvores da unidade amostral (m).

A interpretação dos índices de competição está inteiramente relacionada à maneira de como são calculados. Muitos dos índices contidos na Tabela 2.1 sugerem que, quanto menor o diâmetro da árvore, maior é a competição sobre a mesma. É o caso dos índices IC.1, IC.3, IC.7 e IC.8. O índice IC.2 também traz intrinsecamente esse conceito, pois assume como competidoras as árvores com área transversal maior à árvore-objeto, representando as árvores com diâmetro superiores à essa.

O índice IC.4 expressa relação entre tamanhos, porém, considera a altura da árvore-objeto em relação à altura média das árvores da parcela. A mesma situação se observa para o índice IC.5, no entanto, considera o diâmetro e altura simultaneamente. Finalmente, o índice IC.6 relaciona o somatório dos diâmetros das árvores competidoras com o diâmetro da árvore-objeto e, com isso, quanto maior o número de competidoras e/ou menor o diâmetro da árvore-objeto, maior será o valor do índice e, conseqüentemente, a competição.

Como mencionado anteriormente, Burkhart e Tomé (2012) afirmaram que todos os índices de competição independentes da distância, baseados nas árvores maiores à árvore-objeto, assumem tacitamente competição assimétrica, refletindo, principalmente, a competição por luz. É a situação dos índices IC.2, IC.7 e IC.8. Os demais índices se referem à posição hierárquica da árvore-objeto dentro da unidade amostral.

As árvores mortas e caídas foram desconsideradas, uma vez que não exercem competição sobre as demais árvores e não participam da dinâmica de crescimento do povoamento. Uma situação ocorrente em povoamentos é a presença de árvores com mais de um fuste. Nesses casos, para possibilitar a obtenção de um único índice de competição por árvore, foi calculada a área transversal para cada fuste, e posteriormente somadas, sendo obtido o diâmetro equivalente à essa área transversal (SILVA, 2006; ARAÚJO, 2012; PÁSCOA, 2014). Esse diâmetro foi empregado para o cálculo dos índices de competição. Nesses casos, a altura total considerada foi aquela correspondente ao fuste mais alto (PÁSCOA, 2014).

2.3 AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO

Para avaliar os índices de competição, foi elaborada a matriz de correlação entre esses índices com variáveis dendrométricas e do povoamento (DANIELS, 1976; DANIELS; BURKHART; CLASON, 1986; MATTOS, 2007; WEBER, 2007; CASTRO, 2011; CHASSOT et al., 2011; MARTINS et al., 2011; CURTO, 2015). Para a determinação do

coeficiente a ser aplicado na matriz de correlação, as variáveis a serem correlacionadas foram submetidas ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (5% de significância estatística).

Sendo confirmada a normalidade das distribuições das variáveis, o coeficiente a ser aplicado é o Pearson (r). Esse coeficiente possui diversas aplicações, sendo o primeiro método de correlação estudado por Francis Galton e seu aluno Karl Pearson, em 1897 (SCHULTZ e SCHULTZ, 1992). Esse coeficiente é calculado conforme a expressão (1), sendo a correlação situada no intervalo de -1 a 1.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right) \quad (1)$$

Em que: r = coeficiente de correlação de Pearson; x_i e y_i = conjunto de variáveis x e y submetidas a análise de correlação, respectivamente; \bar{x} e \bar{y} = média aritmética para o conjunto dos valores x e y, respectivamente; s_x e s_y = desvio padrão para o conjunto dos valores x e y, respectivamente; n = número de pares de ordenações.

Por outro lado, não sendo confirmada a normalidade das distribuições das variáveis envolvidas na matriz de correlação, o coeficiente a ser aplicado é o de Spearman (ρ). Esse coeficiente é o mais antigo para variáveis a nível ordinal, e mede a intensidade da relação entre variáveis ordinais (LIRA, 2004). Esse coeficiente é capaz de considerar tendências não lineares, frequentemente observadas em estudos de crescimento (SIEGEL, 1975). Assim, esse coeficiente não é sensível às distribuições assimétricas nem à presença de *outliers*, logo, não exige que os dados procedam de populações normais. É calculado a partir da expressão (2), sendo a correlação situada no intervalo de -1 a 1.

$$\rho = 1 - \left(\frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \right) \quad (2)$$

Em que: ρ = coeficiente de correlação de Spearman; d_i = diferença entre as ordenações; n = número de pares de ordenações.

As variáveis empregadas na matriz de correlação foram o incremento em diâmetro à altura do peito (In.d) e em altura total (In.h), diâmetro à altura do peito (d), altura total (h), probabilidade de mortalidade anual por classe de diâmetro (Pm), área basal por hectare (G) e

os índices de competição testados (IC.1 a IC.8). A probabilidade de mortalidade citada foi calculada conforme a expressão (3).

$$Pm_i = N_m (N_v + N_m)^{-1} \quad (3)$$

Em que: Pm_i = probabilidade de mortalidade anual na classe diamétrica i ; N_v e N_m = número de árvores vivas e mortas da parcela por hectare, respectivamente, para uma mesma idade.

Considerando que cada parcela não foi medida em todas as ocasiões, o número de árvores vivas e mortas (N_v e N_m) foi determinado da seguinte maneira: contabilizando o número de árvores vivas da parcela, em determinada idade, obteve-se o N_v . Para o cálculo de N_m , foi observado o ano correto em que a mortalidade ocorreu, para que essa variável não fosse computada repetidas vezes em sucessivas medições e, conseqüentemente, superestimada. Isso porque a probabilidade de mortalidade considerada não foi acumulada.

Na ocasião da primeira medição de alguma parcela, até a classe de 5 anos de idade, a mortalidade foi desconsiderada. Por outro lado, se a idade se situou acima de 5 anos, o número de árvores mortas foi dado pela média até a idade da parcela, porém, iniciando-se aos 5 anos.

Além da análise da correlação, foi observado o comportamento médio dos índices de competição em função da idade, para diferentes classes de diâmetros e de sítio. Essas classes diamétricas foram definidas conforme a média aritmética (\bar{d}) e o desvio padrão (s_d) dos diâmetros, considerando todas as idades, perfazendo três classes. A classe 1 foi composta pelas árvores com diâmetro mínimo de 21,3 cm ($\bar{d}+0,5s_d$), a classe 2 com diâmetros de 15,8 a 21,2 cm ($\bar{d}-0,5s_d$ a $\bar{d}+0,5s_d$), e a classe 3 com diâmetros menores que 15,8 cm ($\bar{d}-0,5s_d$). A análise foi similar àquela realizada por Martins et al. (2011) e Castro (2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO

O teste de Kolmogorov-Smirnov indicou não haver normalidade dos dados, para todas as variáveis e classes de sítio. Dessa forma, as mesmas foram submetidas a transformações, em uma tentativa de normalizar suas distribuições. Foram testadas as transformações de $\sqrt{x+1}$, $\ln(x+1)$, $\sqrt[4]{x+0,5}$ (COUTO et al., 2009; LÚCIO et al., 2010; STORCK et al., 2011) e, posteriormente, a transformação de Box-Cox (BOX; COX, 1964), em que x representa a variável submetida à transformação.

Porém, todas as variáveis permaneceram com distribuições distintas da normal. Resultado devido, sobretudo, à grande variação das variáveis empregadas e pela presença substancial de valores extremos, como pode ser observado na Figura 2.1. Somente a área basal por hectare (FIGURA 2.1.g) não conteve valores extremos, ao contrário das outras variáveis, principalmente os índices de competição.

Embora sejam tratados como valores extremos, não podem ser considerados como inconsistências (*outliers*). Conforme Lundgren (2011), a simples inspeção visual não é suficiente para que valores amostrais observados sejam rotulados de *outliers*. Dependendo da especificação matemática do índice, como também da variação da variável utilizada em seu cálculo, torna-se inevitável a presença desses valores extremos.

Diante dos resultados, o coeficiente de correlação calculado foi o de Spearman. Tonini, Kaminski e Costa (2008) empregaram o coeficiente de correlação de Spearman para avaliar as relações entre a morfometria, parâmetros da copa e índices de competição (dependentes e independentes da distância) com a produção de sementes de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), no município de Caracaraí, estado de Roraima. Esses autores observaram relação significativa entre a produção de sementes com o comprimento, diâmetro, forma e exposição da copa, ou posição sociológica, com os índices morfométricos grau de esbeltez e índice de abrangência.

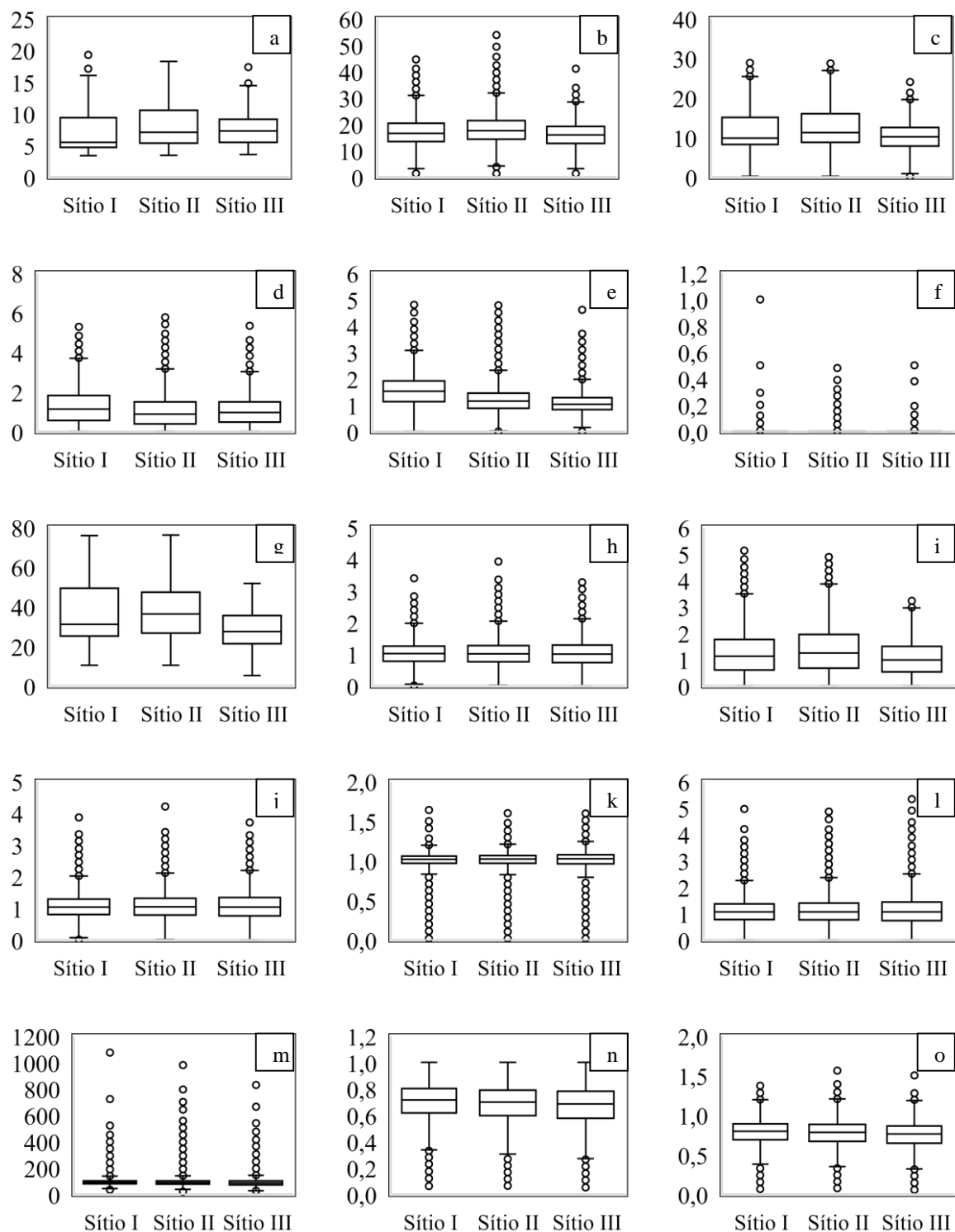


FIGURA 2.1 - BOXPLOTS PARA AS VARIÁVEIS COMPONENTES DA MATRIZ DE CORRELAÇÃO, SENDO IDADE (a), DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (b), ALTURA TOTAL (c), INCREMENTO EM DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO (d), INCREMENTO EM ALTURA TOTAL (e), PROBABILIDADE DE MORTALIDADE (f), ÁREA BASAL (g), ÍNDICES DE COMPETIÇÃO IC.1 ATÉ IC.8 (h ATÉ o, RESPECTIVAMENTE), PARA OS SÍTIOS I, II E III, EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Ebling et al. (2015) também empregaram o coeficiente de correlação de Spearman para avaliar as correlações entre incremento periódico em diâmetro com dados de temperatura média, precipitação e umidade relativa, utilizando dados de uma Floresta de Araucária, localizada no estado do Rio Grande do Sul. Para a maioria das espécies, correlações significativas não foram observadas. Contudo, o incremento em diâmetro da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze indicou forte correlação negativa ($\rho = -0,73$) com precipitação.

Maleki, Kiviste e Korjus (2015) empregaram a matriz de correlação de Spearman para selecionar os índices de competição dependentes e independentes da distância mais correlacionados com o incremento diamétrico, para vidoeiro-branco (*Betula pendula* Roth) na Estônia. Os valores mais altos de correlação foram para os índices dependentes da distância, principalmente para o índice de Rouvinen & Kuuluvainen (1977) e Hegyi (1974).

Na Tabela 2.2 estão apresentadas as matrizes de correlação para as variáveis dendrométricas e do povoamento, por classe de sítio. Os valores acima da diagonal principal se referem ao coeficiente de correlação de Spearman, e aqueles situados abaixo à significância estatística, dada pelo teste “t” (5%).

Grande parte das correlações foram significativas ($p\text{-valor} \leq 0,05$) pelo teste “t”, e os maiores valores do coeficiente de correlação de Spearman foram para o diâmetro e incremento diamétrico. Em relação à idade, para todos os sítios, o IC.2 foi o mais correlacionado com essa variável, indicando elevação no valor do índice de competição com o avanço da idade. Esse resultado é esperado até mesmo pela formulação do IC.2 (BAL), onde ocorre acréscimo da área basal das árvores com o aumento da idade.

O índice de competição mais correlacionado com o diâmetro à altura do peito foi o IC.3, para os sítios I, II e III. Para o sítio II, a relação direta entre o acréscimo do diâmetro e um aumento no valor do índice de competição foi mais evidente, dada à maior correlação. Para o sítio I e III, as correlações se apresentaram sutilmente inferiores. O IC.3 indica que quanto maior o diâmetro, menor é a competição exercida sobre a árvore-objeto.

Para a variável altura total, os valores da correlação assumiram valores abaixo de 0,40, inferiores aqueles encontrados para o diâmetro, sendo a única exceção o IC.2. Em todas as classes de sítio, o índice de competição mais correlacionado com a altura total foi o IC.6.

O índice de competição IC.2 foi o mais correlacionado com o incremento em altura, incremento em diâmetro e área basal, para todas as classes de sítio. Os valores de correlação para o incremento em diâmetro foram superiores àqueles para o incremento em altura, em todas as situações analisadas. Ainda, comparando-se os valores de correlação dos incrementos em diâmetro e altura com aqueles obtidos para o diâmetro e altura, os primeiros se

apresentaram inferiores para quase a totalidade dos índices avaliados. Isso sugere a utilização de modelos de produção ao invés de incremento, para estimar o diâmetro e altura em diferentes idades.

TABELA 2.2 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN ENTRE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E DO POVOAMENTO COM OS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO AVALIADOS, POR CLASSE DE SÍTIO, EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* DA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Sítio I (30,5 m)															
	I	d	h	In.d	In.h	Pm	G	IC.1	IC.2	IC.3	IC.4	IC.5	IC.6	IC.7	IC.8
I		0,73*	0,93*	-0,61*	-0,27*	0,07*	0,92*	-0,02*	0,55*	0,01ns	-0,02*	0,00ns	-0,18*	-0,18*	-0,11*
d	0,00		0,86*	-0,22*	-0,13*	-0,04*	0,74*	0,59*	0,00ns	0,68*	0,52*	0,59*	-0,60*	0,43*	0,49*
h	0,00	0,00		-0,49*	-0,31*	0,04*	0,91*	0,19*	0,35*	0,21*	0,20*	0,21*	-0,39*	0,03*	0,11*
In.d	0,00	0,00	0,00		0,49*	-0,10*	-0,61*	0,40*	-0,65*	0,39*	0,40*	0,40*	-0,26*	0,48*	0,44*
In.h	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,02*	-0,33*	0,17*	-0,31*	0,17*	0,17*	0,18*	-0,12*	0,19*	0,18*
Pm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01		0,07*	-0,16*	0,13*	-0,14*	-0,13*	-0,14*	0,11*	-0,15*	-0,14*
G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,01*	0,57*	0,00ns	-0,04*	-0,01ns	-0,10*	-0,15*	-0,08*
IC.1	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03		-0,76*	1,00*	0,90*	0,99*	-0,87*	0,92*	0,93*
IC.2	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,75*	-0,68*	-0,75*	0,59*	-0,80*	-0,78*
IC.3	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91	0,00	0,00		0,91*	0,99*	-0,88*	0,92*	0,93*
IC.4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,94*	-0,81*	0,83*	0,83*
IC.5	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,88*	0,91*	0,92*
IC.6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,78*	-0,82*
IC.7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,93*
IC.8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sítio II (25,5 m)															
I		0,69*	0,94*	-0,60*	-0,31*	0,09*	0,93*	0,00ns	0,51*	0,00ns	-0,05*	-0,01ns	-0,14*	-0,08*	-0,07*
d	0,00		0,82*	-0,15*	-0,11*	-0,01*	0,69*	0,65*	-0,12*	0,71*	0,54*	0,64*	-0,66*	0,58*	0,59*
h	0,00	0,00		-0,47*	-0,29*	0,07*	0,92*	0,19*	0,31*	0,20*	0,17*	0,20*	-0,36*	0,13*	0,14*
In.d	0,00	0,00	0,00		0,50*	-0,11*	-0,58*	0,39*	-0,61*	0,39*	0,41*	0,40*	-0,28*	0,41*	0,40*
In.h	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00ns	-0,30*	0,15*	-0,27*	0,15*	0,15*	0,16*	-0,11*	0,15*	0,17*
Pm	0,00	0,03	0,00	0,00	0,22		0,09*	-0,12*	0,11*	-0,10*	-0,08*	-0,09*	0,08*	-0,10*	-0,10*
G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00ns	0,53*	0,00ns	-0,06*	-0,01*	-0,06*	-0,04*	-0,03*
IC.1	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00		-0,78*	1,00*	0,89*	0,99*	-0,87*	0,93*	0,94*
IC.2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,78*	-0,69*	-0,77*	0,63*	-0,76*	-0,77*
IC.3	0,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00		0,90*	0,99*	-0,88*	0,92*	0,93*
IC.4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,93*	-0,79*	0,81*	0,82*
IC.5	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,87*	0,92*	0,93*
IC.6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,78*	-0,80*
IC.7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,93*
IC.8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Sítio III (20,5 m)															
I		0,61*	0,92*	-0,55*	-0,18*	0,12*	0,87*	0,02*	0,46*	0,00ns	-0,04*	-0,01ns	-0,10*	-0,05*	-0,02ns
d	0,00		0,80*	-0,03*	-0,02ns	-0,02*	0,61*	0,69*	-0,21*	0,70*	0,56*	0,67*	-0,69*	0,65*	0,67*
h	0,00	0,00		-0,37*	-0,18*	0,07*	0,85*	0,27*	0,25*	0,25*	0,22*	0,25*	-0,31*	0,22*	0,24*
In.d	0,00	0,01	0,00		0,48*	-0,14*	-0,49*	0,39*	-0,58*	0,40*	0,40*	0,41*	-0,34*	0,41*	0,39*
In.h	0,00	0,09	0,00	0,00		-0,06*	-0,18*	0,12*	-0,18*	0,13*	0,14*	0,14*	-0,11*	0,10*	0,10*
Pm	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00		0,10*	-0,12*	0,11*	-0,10*	-0,09*	-0,10*	0,09*	-0,10*	-0,08*
G	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,03*	0,51*	0,00ns	-0,05*	-0,01ns	0,04*	-0,01ns	0,01ns
IC.1	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01		-0,77*	0,99*	0,87*	0,98*	-0,80*	0,93*	0,96*
IC.2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,77*	-0,66*	-0,77*	0,62*	-0,75*	-0,75*
IC.3	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88	0,00	0,00		0,89*	0,99*	-0,81*	0,92*	0,94*
IC.4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,92*	-0,73*	0,78*	0,81*
IC.5	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,81*	0,91*	0,93*
IC.6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		-0,76*	-0,76*
IC.7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,95*
IC.8	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Em que: I = idade do povoamento (anos); d = diâmetro à altura do peito (cm); In.d = incremento em diâmetro à altura do peito (cm); h = altura total (m); In.h = incremento em altura total (m); Pm = probabilidade de mortalidade por classe de diâmetro (%); G = área basal por parcela ($m^3 \cdot ha^{-1} \cdot parcela$); IC.1 a IC.8 = índices de competição de 1 a 8, respectivamente; * e ns = correlação significativa e não significativa, respectivamente.

Conforme a Tabela 2.2, de modo geral, dentre as variáveis analisadas, a probabilidade de mortalidade gerou as menores correlações. Para essa variável, em todas as classes de sítio,

o índice IC.7 foi o mais correlacionado. Esse índice de competição indica que a probabilidade de mortalidade é maior para as árvores com menores diâmetros.

Tomé e Burkhart (1989) testaram diversos índices dependentes da distância na predição do crescimento de árvores individuais de *Eucalyptus globulus*, em Portugal. Um dos critérios empregados para a seleção do melhor índice de competição foi a matriz de correlação simples entre esses índices e o crescimento em diâmetro à altura do peito e em área basal. Melhores resultados foram obtidos com os índices de área potencialmente disponível e modificados.

Mattos (2007) empregou a matriz de correlação para analisar a relação entre variáveis dendrométricas e do povoamento com o índice de BAL (IC.2). As correlações entre o índice e o diâmetro à altura do peito foram significativas, assumindo valores de -0,28, -0,23 e -0,19, para as espécies *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* Vell. E e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud, respectivamente.

Chassot et al. (2011) empregaram a correlação de Pearson entre variáveis dimensionais e de competição para *A. angustifolia* em Floresta Ombrófila Mista, no Rio Grande do Sul. Esses autores encontraram valores de correlação semelhantes aos obtidos nesse trabalho.

Martins et al. (2011) avaliaram diferentes índices de competição independentes da distância para plantios clonais de eucalipto, na região de Monte Dourado, estado do Pará, por meio da matriz de correlação, considerando três classes de sítio. As correlações entre os índices de competição e a probabilidade de mortalidade foram superiores ao presente trabalho. Esses autores concluíram que o índice mais adequado para descrever a competição foi o de BAI (IC.1).

Castro (2011) utilizou a matriz de correlação simples para avaliar a relação entre o crescimento dimensional com cinco índices de competição, para povoamentos clonais de eucalipto, situados na região de Monte Dourado, Pará. Os valores de correlação apresentaram-se superiores à presente pesquisa, para o incremento em diâmetro, incremento em altura e probabilidade de mortalidade.

Como se observou, a maioria dos trabalhos que empregaram a matriz de correlação na avaliação e seleção de índices de competição utilizaram o coeficiente de correlação de Pearson. As correlações ordinais, como é o caso do coeficiente de Spearman, não podem ser interpretadas como as de Pearson. Inicialmente, não mostram necessariamente tendência linear, mas para valores positivos da correlação, aumentos no valor de uma variável correspondem a aumentos no valor da outra, ocorrendo o oposto para coeficientes negativos (BUNCHART; KELLNER, 1999).

Na Figura 2.2 está apresentado o comportamento dos índices de competição IC.1 a IC.4 em função da idade e classe diamétrica, por sítio. Os índices IC.1, IC.3 e IC.4 assumem, conforme suas formulações, que a competição aumenta quanto maior for o valor do índice. Por outro lado, o IC.2 indica maior competição quando menor for o valor do índice.

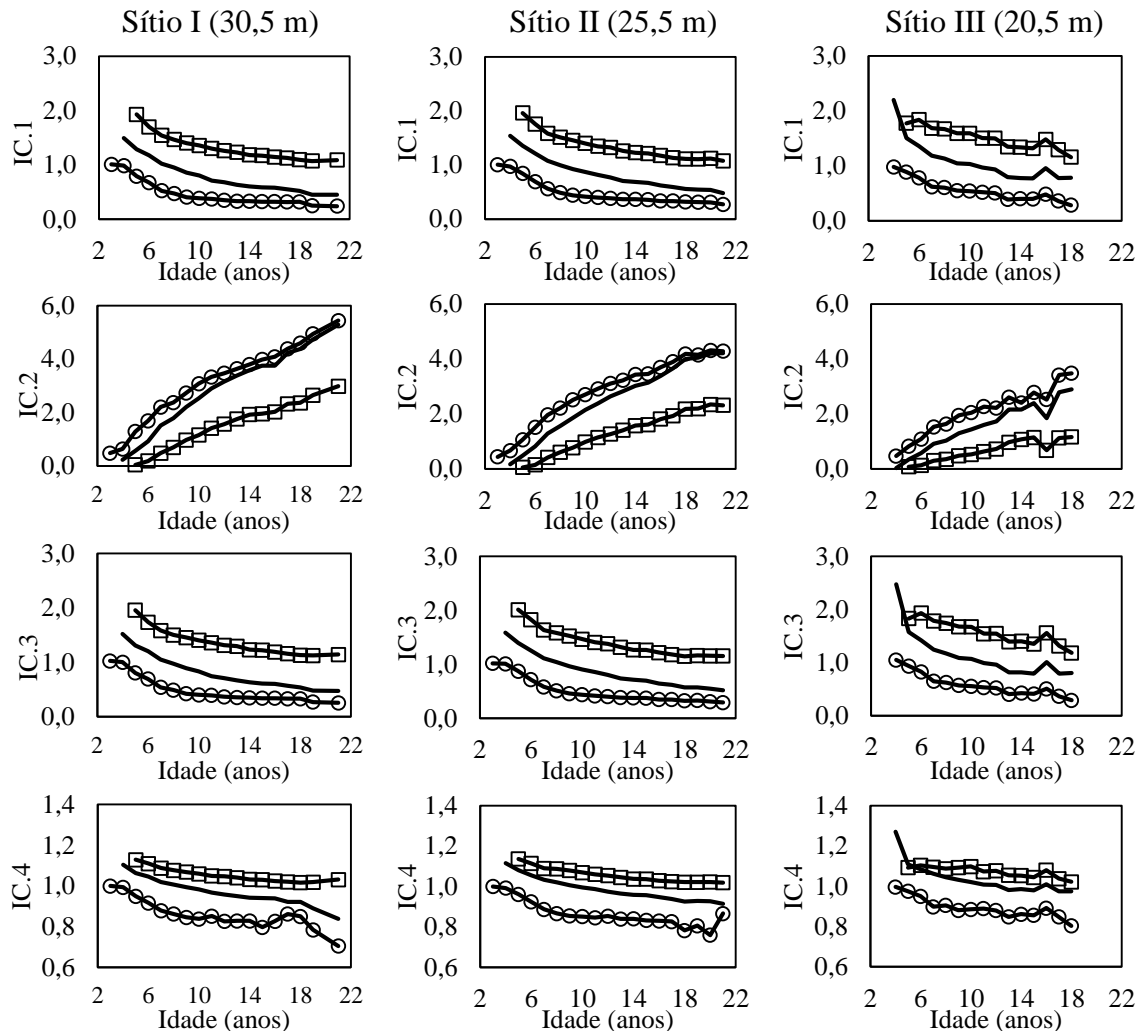


FIGURA 2.2 - COMPORTAMENTO MÉDIO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO IC.1 $\left(\left(d_i q^{-1}\right)^2\right)$, IC.2

$\left(\sum g_i\right)$, IC.3 $\left(\left(d_i \bar{d}^{-1}\right)^2\right)$, E IC.4 $\left(h_i \bar{h}^{-1}\right)$ EM FUNÇÃO DA IDADE E SÍTIO, NAS

CLASSES DE DIÂMETRO 1 ($d \geq 21,3$ cm) (\square), 2 ($15,8 \leq d \leq 21,2$ cm) (—) E 3 ($d < 15,8$ cm) (\circ), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Em geral, de acordo com a Figura 2.2, para um mesmo índice de competição, a tendência foi similar nas diferentes classes de sítio. Para o índice IC.1, nas três classes de sítio e de diâmetros, observa-se aumento da competição com o avanço da idade devido, essencialmente, ao aumento nos diâmetros das árvores.

Nas idades iniciais, a competição foi baixa dado ao pequeno porte das árvores, no qual o povoamento se apresentou mais homogêneo, com variância diametral baixa, o que resultou maior proximidade do diâmetro médio aritmético com o diâmetro quadrático. Ainda nessas idades, o diâmetro médio quadrático apresentou-se menor que a mediana dos diâmetros, proporcionando número superior de árvores com diâmetros maiores ao diâmetro quadrático, elevando o valor do índice IC.1.

Com o avanço da idade, o povoamento se tornou mais heterogêneo, definindo as árvores dominantes e suprimidas, em que essas últimas passaram a investir mais efetivamente no crescimento em altura em relação ao diâmetro. Isso contribuiu para o aumento da variância dos diâmetros, distanciando a média aritmética do diâmetro quadrático, que se tornou superior à mediana, e reduziu o número de árvores com diâmetro maior que o diâmetro quadrático, promovendo redução no valor do índice de competição. De acordo com Veiga, Carvalho e Brasil (1976), a diferença percentual entre a média aritmética e o diâmetro quadrático em maciços florestais é maior quanto maior for o desvio padrão dos diâmetros, para populações com diâmetros médios semelhantes.

Ainda conforme a Figura 2.2, para o índice de competição IC.2, os resultados foram semelhantes para as classes diamétricas 2 e 3, para um mesmo sítio. É evidente o aumento da competição com o avanço da idade, dado que esse índice está estritamente relacionado com a área basal. Além disso, percebe-se menores valores do índice na classe de sítio III, devido ao menor incremento em área basal. Os menores valores do índice foram para as árvores dominantes (classe diamétrica 1), visto que há número menor de árvores maiores em área basal em relação a essas.

O índice IC.3 apresentou o mesmo comportamento do índice IC.1, porém, com valores ligeiramente inferiores, resultado esperado uma vez que as formulações matemáticas dos índices são similares, diferenciadas apenas pelo diâmetro médio e quadrático. Esse índice foi amplamente recomendando para determinar a competição de povoamentos homogêneos de mesma idade, tamanho e crescimento potencial (DIMOV; CHAMBERS; LOCKHART, 2008) devido à vantagem de ser independente da distância e por explicar boa parte da variação do crescimento. O índice IC.4 também indicou aumento da competição com o avanço da idade. Entretanto, oscilou menos em relação aos demais índices, principalmente para as árvores no estrato superior e no sítio I.

Na Figura 2.3 está apresentado o comportamento dos índices de competição IC.5 a IC.8 em função da idade e classe diamétrica, por sítio. A interpretação dos índices IC.5, IC.7 e IC.8 são similares, indicando aumento da competição à medida que se eleva o valor do

índice. Ao contrário, o índice IC.6 demonstra aumento da competição quanto menor for o valor do índice.

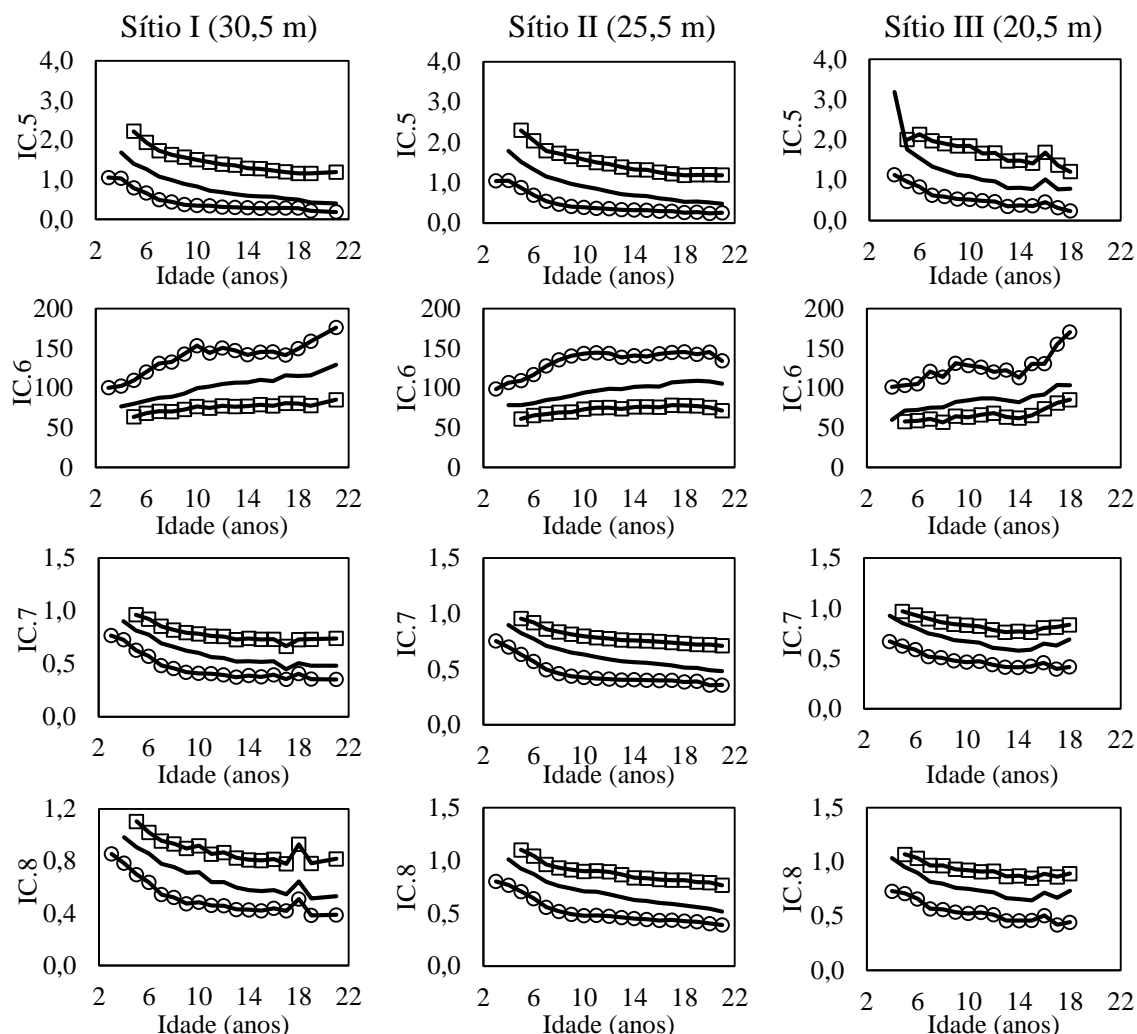


FIGURA 2.3 - COMPORTAMENTO MÉDIO DOS ÍNDICES DE COMPETIÇÃO $IC.5 \left(\left(d_i^2 h_i \right) \left(\bar{d}^2 \bar{h} \right)^{-1} \right)$,

$IC.6 \left(\sum d_j d_i^{-1} \right)$, $IC.7 \left(d_i d_{\max}^{-1} \right)$ E $IC.8 \left(d_i d_{\text{dom}}^{-1} \right)$ EM FUNÇÃO DA IDADE E SÍTIO, NAS CLASSES DE DIÂMETRO 1 ($d \geq 21,3$ cm) (\square), 2 ($15,8 \leq d \leq 21,2$ cm) ($-$) E 3 ($d < 15,8$ cm) (\circ), EM POVOAMENTOS DE *P. TAEDA* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Conforme a Figura 2.3, o índice IC.5 indicou aumento da competição com o avanço da idade. Esse foi obtido pelo diâmetro e altura da árvore-objeto, e os respectivos valores médios por parcela, representando o produto dos índices IC.3 e IC.4. Pôde-se observar também que o índice IC.6 demonstrou que as árvores dominantes sofreram menos efeito da competição, independente da classe de sítio e idade. Ainda, demonstrou que árvores de menores dimensões são mais afetadas, sendo mais pronunciado nas idades mais avançadas.

Os índices IC.7 e IC.8 apresentaram tendência semelhante. Todavia, o índice IC.7 com valores ligeiramente inferiores, por considerar o diâmetro máximo, ao contrário do IC.8, que emprega o diâmetro dominante. O comportamento foi o mesmo para as diferentes classes de sítio e de diâmetro.

Castro (2011) avaliou cinco índices de competição considerando classes de diâmetros, para povoamentos clonais de eucalipto da região de Monte Dourado, Pará. As tendências observadas para o IC.2 foram as mesmas verificadas nesse trabalho. Os demais índices (IC.1, IC.3, IC.4 e IC.5) também adquiriram resultados semelhantes, exceto para a classe diamétrica superior, em todos as classes de sítio.

Martins et al. (2011) analisaram o comportamento médio de cinco índices de competição independentes da distância, para plantios clonais de eucalipto da região de Monte Dourado, estado do Pará. A tendência para o IC.1 foi similar à encontrada nesse trabalho, com exceção da classe de árvores dominantes, a qual apresentou tendência oposta com o avanço da idade, resultado também observado para os índices IC.3, IC.4 e IC.5. Para o índice IC.2, os resultados encontrados foram semelhantes ao desse trabalho.

De acordo com os critérios de avaliação, não houve um único índice que foi o mais correlacionado com todas as variáveis. No entanto, existiram aqueles que se destacaram em uma ou outra variável, como os índices IC.3, IC.6 e IC.1, para diâmetro, altura total e probabilidade de mortalidade, respectivamente.

4 CONCLUSÕES

Não houve um único índice de competição cuja correlação foi a maior para todas as variáveis correlacionadas. Para o diâmetro, altura total e probabilidade de mortalidade, os índices de Glover e Hool (IC.3), Lorimer (IC.6) e Stage (IC.1) foram os mais correlacionados, respectivamente, para as três classes de sítio.

Os valores de correlação para a produção em diâmetro e altura total foram superiores àqueles para o incremento em diâmetro e incremento em altura total, para quase todos os índices de competição testados, indicando que, para estimar as variáveis diâmetro e altura total para povoamentos de *P. taeda* da região de Telêmaco Borba, Paraná, em diferentes idades, modelos de produção são preferíveis.

Os índices de competição independentes da distância testados demonstraram satisfatoriamente o comportamento médio da competição das árvores, em relação à idade e para as três classes de sítio.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. R. **Estudos florístico e fitossociológico de um fragmento de vegetação em área de floresta ombrófila densa, no Distrito de Castelo de Sonhos, Município de Altamira/PA.** 103 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2012.
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. Evaluation of Competition Indices in Individual Tree Growth Models. **Forest Science**, v.41, n.2, p.360-377, 1995.
- BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Statistical Society. Series B (Methodological)**, v.26, n.2, p.211-252, 1964.
- BUNCHART, G.; KELLNER, S. R. O. **Estatística sem mistérios.** 2.ed. Petrópolis: Vozes, 1999. 303p.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands.** New York: Springer, 2012. 457p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem de árvore individual para uma floresta estacional Semidecidual utilizando redes neurais.** 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares.** 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGUI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista. **Ciência Florestal**, v.21, n.2, p.303-313, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098>
- CONTRERAS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, v.262, n.11, p.1.939-1.949, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2011.08.031>
- COUTO, M. R. M.; LUCIO, A. D.; LOPES, S. J.; CARPES, R. H. Transformações de dados em experimentos com abobrinha italiana em ambiente protegido. **Ciência Rural**, v.39, n.6, p.1.701-1.707, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009005000110>
- CURTO, R. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.** 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2015.
- DANIELS, R. F. Notes: simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. **Forest Science**, v.22, n.4, p.454-456, 1976.

DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal Forest Research**, Vancouver, v.16, p.1.230-1.237, 1986. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x86-218>

DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. **Forest management**, 3 ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1987.

DIMOV, L. D.; CHAMBERS, J. L.; LOCKHART, B. R. Five-year radial growth of red oaks in mixed bottomland hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.255, n.7, p.2.790-2.800, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.070>

EBLING, A. A.; ABRÃO, S. F.; FIORENTIN, L. D.; SOARES, I. D.; MIRANDA, R. O. V.; DAVID, H. C. Correlations of the Growth and Dynamic with Climatic Variables in A Native Forest in Southern Brazil. **Australian Journal of Basic & Applied Sciences**, v.9, n.23, p.287-291, 2015.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. (Ed.), **Growth Models for Tree and Stand Simulation**. Royal College of Forestry, Stockholm, 1974. p.74–90.

LAAR, A.; AKÇA, A. **Forest mensuration**. Netherlands: Springer, 2007. 383p.

LINKEVICIUS, E.; KULIESIS, A.; RÖHLE, H.; SCHRÖDER, J.; ALEINIKOVAS, M. The impact of competition for growing space on diameter, basal area and height growth in pine trees. **Baltic Forestry**, v.20, n.2, p.301-313, 2014.

LIRA, S. A. **Análise de correlação: abordagem teórica e de construção dos coeficientes com aplicações**. 209 f. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) – Curitiba, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.6, n.4, p.343–360. 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90042-7](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(83)90042-7)

LÚCIO, A. D.; COUTO, M. R. M.; TREVISAN, J. N.; MARTINS, G. A. K.; LOPES, S. J. Excesso de zeros nas variáveis observadas: estudo de caso em experimento com brócolis. **Bragantia**, v.69, n.4, p.1.035-1.046, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052010000400032>

LUNDGREN, W. J. C. **Uso da geoestatística na estimativa volumétrica de clones de *Eucalyptus* sp. no Pólo Gesseiro do Araripe**. 165 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, 2011.

MÄKINEN, H. Possibilities of competition indices to describe competitive differences between Scots pine families. **Silva Fennica**, v.31, n.1, p.43–52, 1997. DOI: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.a8509>

MALEKI, K.; KIVISTE, A.; KORJUS, H. Analysis of individual tree competition effect on diameter growth of silver birch in Estonia. **Forest System**, v.24, n.2, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2015242-05742>

MARTIN, G. L.; EK, A. R. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. **Forest Science**, v.30, n.3, p.731–743, 1984.

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.9, p.1089-1098, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011000900017>

MATTOS, R. B. **Produtividade e incremento de *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* Vell. e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. Ex Steud., em floresta nativa no Rio Grande do Sul, RS**. 106 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MUNRO, D. D. Forest growth models – a prognosis. In: FRIES, J. (Ed.). **Growth models for tree and stand simulation**. Royal College of Forestry. Stockholm, p.1- 21, 1974.

PÁSCOA, K. J. V. **Modelagem e análise do crescimento de *Eremanthus Erythropappus* (DC.) Macleish em povoamento plantado**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model**. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2009. 664p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>

PRODAN, M.; PETERS, R.; COX, F.; REAL, P. **Mensura forestal**. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997. 562p.

RADTKE, P. J.; WESTFALL, J. A.; BURKHART, H. E. Conditioning a distance-dependent competition index to indicate the onset of inter-tree competition. **Forest Ecology Management**, v.175, n.1-3, p.17–30, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00118-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00118-4)

ROITMAN, I. C. **Modelagem espacial e temporal na mata de galeria do Gama – DF**. 153 f. Tese (Doutorado em Ecologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SCHULTZ, D. P.; SCHULTZ, S. E. **História da psicologia moderna**. 16. ed. São Paulo: Cultrix, 1992. 439p.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica: para as ciências do comportamento**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 350p.

SILVA, J. A. **Fitossociologia e relações alométricas em caatinga nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte**. 93 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

SOARES, P.; TOMÉ, M. Distance dependent competition measures for eucalyptus plantations in Portugal. **Ann. For. Sci.**, v.56, n.4, p.307-319, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19990405>

STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, Vancouver, v.38, n.4, p.890-898, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/X07-192>

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137. 1973. 32p.

STORCK, L.; GARCIA, D. C.; LOPES, S. J.; ESTEFANEL, V. **Experimentação vegetal**. Santa Maria: UFSM, 2011. 200p.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v.35, n.3, p.816-831, 1989.

TONINI, H. **Índice de competição e o seu uso na modelagem do crescimento das árvores**. Boa Vista: Embrapa Roraima, 2007. 30p. (Documentos / Embrapa Roraima; 8).

TONINI, H.; KAMINSKI, P. E.; COSTA, P. Relação da produção de sementes de castanha-do-brasil com características morfométricas da copa e índices de competição. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.11, p.1.509-1.816, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2008001100009>

VEIGA, R. A. A.; CARVALHO, C. M.; BRASIL, M. A. M. Diferença porcentual entre diâmetro médio e diâmetro quadrático médio em maciços florestais. **Revista Floresta**, v.7, n.2, p.25-35. 1976.

WEBER, K. S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WEINER, J. Asymmetric competition in plant populations. **Trends in Ecology and Evolution**, v.5, n.11, p.360-364, 1990. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0169-5347\(90\)90095-U](http://dx.doi.org/10.1016/0169-5347(90)90095-U).

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW, J. A. J; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Oxford: John Wiley & Sons, 415p. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119998518>

WIMBERLY, M. C.; BARE, B. B. Distance-dependent and distance-independent models of Douglas-fir and western hemlock basal area growth following silvicultural treatment. **Forest Ecology and Management**, v.89, n.1-3, p.1-11, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(96\)03870-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03870-4)

CAPÍTULO III

MORTALIDADE EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar e selecionar o modelo mais adequado para estimar a probabilidade de mortalidade de povoamentos de pinus. Os dados foram provenientes de parcelas permanentes em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L., localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná, com idade de 3,2 a 21,0 anos. Inicialmente, foi avaliada a dinâmica do povoamento perante as árvores vivas e mortas, por idade e classe de sítio. Também, foi analisado o comportamento do número de árvores vivas e mortas por classe diamétrica, assim como determinada a amplitude diamétrica de ocorrência da mortalidade. Análise qualitativa foi realizada com o intuito de identificar outras causas da mortalidade do povoamento. A mortalidade do povoamento foi estimada por meio de modelos de probabilidade de mortalidade por classe diamétrica, sendo testados quatro modelos. O percentual de sobrevivência foi de 73, 75 e 63% aos 18 anos de idade, para os sítios I, II e III, respectivamente. Ocorrência de mortalidade foi observada a partir dos 5 anos de idade, até a classe diamétrica de 28 cm e entre o diâmetro mínimo até 75% do diâmetro médio aritmético da parcela. A mortalidade do povoamento em estudo relacionou-se, em grande parte, à mortalidade irregular, sobretudo aquela provocada por ataque de macaco-prego, sendo que a mortalidade regular apresentou pouco expressividade. O modelo exponencial foi aquele que melhor estimou o número de árvores mortas por hectare, para as três classes de sítio, o qual empregou o índice de área basal (BAI) como variável independente, assim como o sítio (S), centro da classe diamétrica (CC_d), idade (I) e área basal da classe diamétrica (G_{classe}).

Palavras-chave: Mortalidade regular; análise qualitativa; probabilidade de mortalidade; função exponencial.

CHAPTER III

MORTALITY IN *Pinus taeda* L. STANDS

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate and select the most appropriate model to estimate the mortality probability in pine stands. Data were obtained from permanent plots unthinned stands of *Pinus taeda* L., located in the region of Telêmaco Borba, State of Parana, Brazil, aged from 3.2 to 21.0 years. Initially, the living and dead trees dynamics were evaluated, by age and site class. Also, the behavior of the number of living and dead trees were analyzed by diameter class, as well as specified diametric range of occurrence of mortality. Qualitative analysis was performed in order to find out other causes of stand mortality. The mortality of the stand was estimated using mortality probability models by diameter class, and tested four models. The percentage of survival was 73, 75 and 63% at 18 years for sites I, II and III, respectively. The occurrence of mortality was observed from 5 years of age, until the diametric class of 28 cm and the minimum diameter until 75% of the arithmetical mean diameter of the plot. The mortality of the stand studied is related, in large part, to the irregular mortality, especially that caused by capuchin monkey, and the regular mortality represented, on average, only 1%. The exponential model that best estimated the number of dead trees per hectare, for the three site classes, which used the basal area index (BAI) as the independent variables, as well as site (S), center of diameter class (CC_d), age (I) and basal area by diameter class (G_{classe}).

Keywords: Regular mortality; qualitative analysis; probability of mortality; exponential function.

1 INTRODUÇÃO

Mortalidade de árvores é um fator chave que influencia a dinâmica da floresta e, portanto, sua estimação requer atenção especial (YANG; TITUS; HUANG, 2003). Dois tipos de mortalidade normalmente ocorrem em povoamentos equiâneos, a mortalidade regular e a irregular (STAEBLER, 1955; WEISKITTEL et al., 2011).

A mortalidade regular é aquela provocada por fatores não catastróficos como competição, idade e fatores genéticos ou senescência (MIRANDA et al., 1989; DOBBERTIN; BIGING, 1998). Mortalidade irregular em um povoamento equiâneo é geralmente associada com algum evento catastrófico ou aleatório, como quedas provocadas por ventos, fogo, inseto ou epidemia de doenças. Em povoamentos de pinus, além dos eventos mencionados, tem-se o ataque do macaco-prego (*Sapajus nigritus*, Goldfuss, 1809), com danos relevantes em muitos casos. Assim, a mortalidade irregular é difícil de se prever (LIN, 1973).

Modelos para predição da probabilidade de mortalidade de árvores individuais são componentes essenciais em sistemas de predição do crescimento e produção florestal (BUFORD; HAFLEY, 1985; CAO, 1997). Vinculando esses modelos àqueles de crescimento em diâmetro e altura de árvores individuais, assim como o recrutamento em florestas naturais, pode-se prever o desenvolvimento do povoamento florestal ao longo do tempo (TECK; HILT, 1990). A precisão dos modelos de crescimento depende largamente da precisão da estimativa de sobrevivência da árvore (SIMS et al., 2009).

A mortalidade de árvores pode ser estimada a partir de uma função baseada no estado fisiológico da árvore, a qual requer informações detalhadas de sua fisiologia; por meio da estimativa de alguma condição fisiológica da árvore e estabelecimento de limites a partir do qual a mortalidade de árvores pode ser estimada; e pela determinação da probabilidade da mortalidade da árvore individual dentro de um grupo com características semelhantes (GLOVER; HOOL, 1979).

Recentemente, a maioria dos modelos de sobrevivência (ou mortalidade) foi desenvolvida para a árvore individual (MABVURIRA; MIINA, 2002). Uma das formas mais comuns para modelar a mortalidade de árvores individuais é por modelos estatísticos. Geralmente, os parâmetros de uma função não linear, delimitada por 0 e 1, são estimados usando regressão linear ponderada ou um procedimento de máxima verossimilhança (NETER; MAYNES, 1970). Funções lineares e polinomiais também foram frequentemente usadas para modelar a mortalidade entre 1960 e 1970 por modelos estatísticos (LEE, 1971).

O modelo de regressão logística é geralmente aplicado para modelar a probabilidade da mortalidade ao nível da árvore (CASTEL-BRANCO, 2014). A propósito, quase todas as equações de mortalidade em nível de árvore usam regressão logística para estimar essa variável (WEISKITTEL et al., 2011). Como exemplos, o modelo logístico foi empregado para estimar a mortalidade nos trabalhos de Monserud (1976), Hamilton (1986), Cao (1997), Monserud e Sterba (1999), Cao (2000), Cao e Strub (2008), Sims et al. (2009), Pukkala, Lahde e Laiho (2009), Martins (2011), Castro (2011) e Orellana (2014).

O desenvolvimento de equações de mortalidade normalmente requer dados de remediações de parcelas permanentes. Porém, esses dados, muitas vezes, contêm grande proporção de observações sem ocorrência de mortalidade, mesmo ao longo de vários anos (ZHAO et al., 2007). Conhecer a probabilidade de sobrevivência de cada árvore é essencial para representar a dinâmica da floresta (BUCHMAN; PEDERSON; WALTERS, 1983).

Em alguns casos, a predição da mortalidade é desconsiderada em povoamentos bem manejados. No entanto, conforme Vanclay (1994), essa hipótese pode ser aceita para povoamentos manejados de forma intensiva, mas para aqueles fora dessa condição ou para florestas naturais, a mortalidade é relevante e deve ser levada em conta.

Com isso, verifica-se a importância do conhecimento da mortalidade de um povoamento, sobretudo no desenvolvimento de estratégias vinculadas ao manejo florestal. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar e selecionar o modelo mais adequado para estimar a probabilidade de mortalidade de povoamentos de *P. taeda* situados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS

As características da área, a procedência e as informações dos dados empregados nesta pesquisa e estatísticas descritivas para as principais variáveis dendrométricas e do povoamento estão apresentadas no capítulo I.

As classes de sítio foram definidas no capítulo I, empregando-se o método da curva-guia e o modelo de Chapman-Richards, considerando uma idade índice de 18 anos, cuja equação resultante foi $h_{\text{dom}} = 41,224399(1 - e^{-0,061832 I})^{1,156161}$, com erro padrão da estimativa percentual (S_{yx}) igual a 9,5%, em que h_{dom} e I são a altura dominante (m) e idade (anos), respectivamente. Foram consideradas três classes de sítio, sendo a classe I (30,5 m) compreendendo alturas dominantes na idade índice de 28,1 a 33,0 m; a segunda classe (25,5 m) englobando alturas dominantes entre 23,1 a 28,0 m; e a classe III (20,5 m) envolvendo alturas dominantes de 18,0 a 23,0 m, representando as classes de produtividade alta, média e baixa, respectivamente.

Para a estimativa das alturas totais das árvores das parcelas foi utilizado o modelo hipsométrico genérico $h = e^{0,72145+0,02395S-5,90105d^{-1}+0,72669\ln I}$, com S_{yx} igual a 6,7%, ajustado no capítulo I, em que h é a altura total (m), S o índice de sítio (m), d e I como descritos anteriormente.

2.2 ANÁLISE DA MORTALIDADE DO POVOAMENTO

Análises da sobrevivência e mortalidade foram realizadas, sendo avaliado o total de árvores vivas e mortas por hectare, por idade e classe de sítio. Ainda, foi observado o comportamento do número de árvores vivas e mortas por classe diamétrica e idade, considerando o povoamento sem distinção em classes de sítio. A amplitude diamétrica adotada foi de 2 cm.

2.3 ANÁLISE QUALITATIVA DO POVOAMENTO

Conforme mencionado anteriormente, a mortalidade de árvores pode estar relacionada a fatores catastróficos ou não, perfazendo os dois tipos de mortalidade, irregular e regular,

respectivamente. Com o intuito de identificar fatores catastróficos que influenciaram a redução de árvores sobreviventes com o avanço da idade, foi feita uma avaliação qualitativa do povoamento, sendo verificado o número médio de árvores tombadas pela ação de ventos, caídas e atacadas por macaco-prego, para cada classe de sítio.

2.4 MODELOS DE MORTALIDADE

Muitos processos biológicos na natureza são basicamente não lineares, e podem ser descritos por meio de modelagem empírica (PAYANDEH, 1983). Assim, para estimar a probabilidade de mortalidade, foram testados quatro modelos, apresentados na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 - MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR A PROBABILIDADE DE MORTALIDADE EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Nº.	Modelo	Especificação
1	Logístico (a)	$P_m = \left(1 + e^{\beta_0 + \beta_1 IC_i}\right)^{-1} + \varepsilon_i$
2	Logístico (b)	$P_m = \left(1 + e^{\beta_0 + \beta_1 IC_i + \beta_2 CC_d + \beta_3 h_{media} + \beta_4 I + \beta_5 G_{classe} + \beta_6 S}\right)^{-1} + \varepsilon_i$
3	Exponencial	$P_m = \beta_0 + e^{(\beta_1 + \beta_2 IC_i + \beta_3 CC_d + \beta_4 h_{media} + \beta_5 I + \beta_6 G_{classe} + \beta_7 S)} + \varepsilon_i$
4	Buchman	$P_m = \beta_0 + \left(1 + e^{\beta_1 + \beta_2 IC_i + \beta_3 I + \beta_4 CC_d + \beta_5 G_{classe} + \beta_6 S + \beta_7 h_{media}}\right)^{-1} + \varepsilon_i$

Em que: P_m = probabilidade de mortalidade por classe diamétrica; IC_i = índice de competição; CC_d = centro da classe diamétrica (cm); h_{media} = altura total média da classe diamétrica (m); I = idade da parcela (anos); G_{classe} = área basal da classe diamétrica ($m^2 \cdot ha^{-1} \cdot classe$); S = índice de sítio (m); β_i = coeficientes a serem estimados; ε_i = erro aleatório da equação.

Os modelos apresentados na Tabela 3.1 foram selecionados conforme resultados dispostos na literatura (SIMS et al., 2009; MARTINS et al., 2011; THAPA, 2014). Muitas variáveis independentes, e suas combinações, foram avaliadas em modelos de probabilidade de mortalidade, como o diâmetro à altura do peito, altura total, classe de copa, área basal e número de árvores por hectare, diâmetro à altura do peito, área basal e altura total médios por classe, e uma medida de competição exercida sobre a árvore individual (GLOVER e HOOL, 1979).

O modelo logístico foi utilizado de duas maneiras. Na primeira, a probabilidade de mortalidade foi estimada somente em função do índice de competição (HAMILTON, 1986; MARTINS, 2011; CASTRO, 2011). No segundo caso, além desse índice, foi estimada em função de variáveis do povoamento (MONSERUD, 1976; GLOVER; HOOL, 1979; AVILA; BURKHART, 1992; MONSERUD; STERBA, 1999; SIMS et al., 2009, THAPA, 2014).

O modelo exponencial também utilizou variáveis do povoamento. Esse modelo foi utilizado por Moser (1972), Payandeh (1983) e Martins (2011). Finalmente, o modelo 4 foi

citado em Buchman, Pederson e Walters (1983), porém, com modificações, uma vez que foram incluídas outras variáveis na presente pesquisa.

A probabilidade de mortalidade foi calculada conforme a expressão (5). Essa probabilidade foi considerada de ocorrência anual (FLEWELLING; MONSERUD, 2002). Conforme Glover e Hool (1979), é uma probabilidade empírica de mortalidade das árvores individuais num grupo de árvores com características similares. A fórmula é baseada naquela empregada em Glover e Hool (1979), Machado et al. (2002), Martins (2011) e Castro (2012).

$$Pm_i = N_m(N_v + N_m)^{-1} \quad (5)$$

Em que: Pm_i = probabilidade de mortalidade anual por classe diamétrica i ; N_v e N_m = número de árvores vivas e mortas da parcela por hectare, respectivamente, para uma mesma idade.

Considerando que cada parcela não foi medida em todas as ocasiões, o número de árvores vivas e mortas (N_v e N_m) foi determinado da seguinte maneira. Contabilizando o número de árvores vivas da parcela, em determinada idade, obteve-se o N_v . Para o cálculo de N_m , foi observado o ano correto em que a mortalidade ocorreu, para que essa variável não fosse computada repetidas vezes em sucessivas medições e, conseqüentemente, superestimada. Isso porque a probabilidade de mortalidade considerada não foi acumulada.

Na ocasião da primeira medição de alguma parcela, até a classe de 5 anos de idade, a mortalidade foi desconsiderada. Por outro lado, se a idade se situou acima de 5 anos, o número de árvores mortas foi a média até a idade da parcela, iniciando-se aos 5 anos.

Como informado anteriormente, a amplitude da classe diamétrica considerada foi de 2 cm, sendo o valor central de cada classe empregado como variável independente nos modelos. A média aritmética da altura total das árvores componentes também foi usada como variável independente. A área basal por classe foi obtida ao somar as áreas transversais de cada árvore da classe, sendo extrapolada para o hectare, a partir da área da parcela.

Dentre os oito índices de competição testados e descritos no capítulo II (IC.1 a IC.8), foram empregados os três mais correlacionados com a probabilidade de mortalidade (Pm). A medida de correlação utilizada foi o coeficiente de correlação de Spearman, a 5% de significância. Desta forma, cada modelo foi ajustado três vezes, um para cada índice de competição. O coeficiente de correlação empregado foi o de Spearman, considerando 5% de significância estatística, descrito no capítulo II. Como o sítio (S) representou uma das variáveis

independentes nos modelos (Tabela 3.2), a correlação foi obtida sem considerar a distinção em classes de sítio.

2.5 AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Todos os modelos selecionados para estimar a probabilidade de mortalidade foram não lineares. Diante disso, o método utilizado para ajustar as equações foi o algoritmo de Levenberg-Marquardt. Tanto para a regressão como para a significância dos coeficientes, o nível de significância adotado foi de 5% ($p\text{-valor} \leq 0,05$). Para avaliar os modelos, foi empregado o erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$) (DRAPER; SMITH, 1998), calculados para a variável probabilidade de mortalidade e também para a estimativa do número de árvores mortas por hectare. Ainda, foram calculadas as estatísticas viés absoluto ($VA = \sum_{i=1}^n \frac{y_i - \hat{y}_i}{n}$) e viés absoluto em módulo ($VAM = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{n}$) (MÔRA, 2015; MURTA JÚNIOR et al., 2015), em que y_i e \hat{y}_i são os valores observados e estimados, respectivamente, e n é o número de observações. Além disso, foi realizada a análise dos resíduos para verificar possíveis tendências nas estimativas do número de árvores mortas por hectare, em relação às classes de idade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ANÁLISE DA MORTALIDADE DO POVOAMENTO

O número de árvores vivas e mortas por idade, em cada classe de sítio, está apresentado na Figura 3.1.

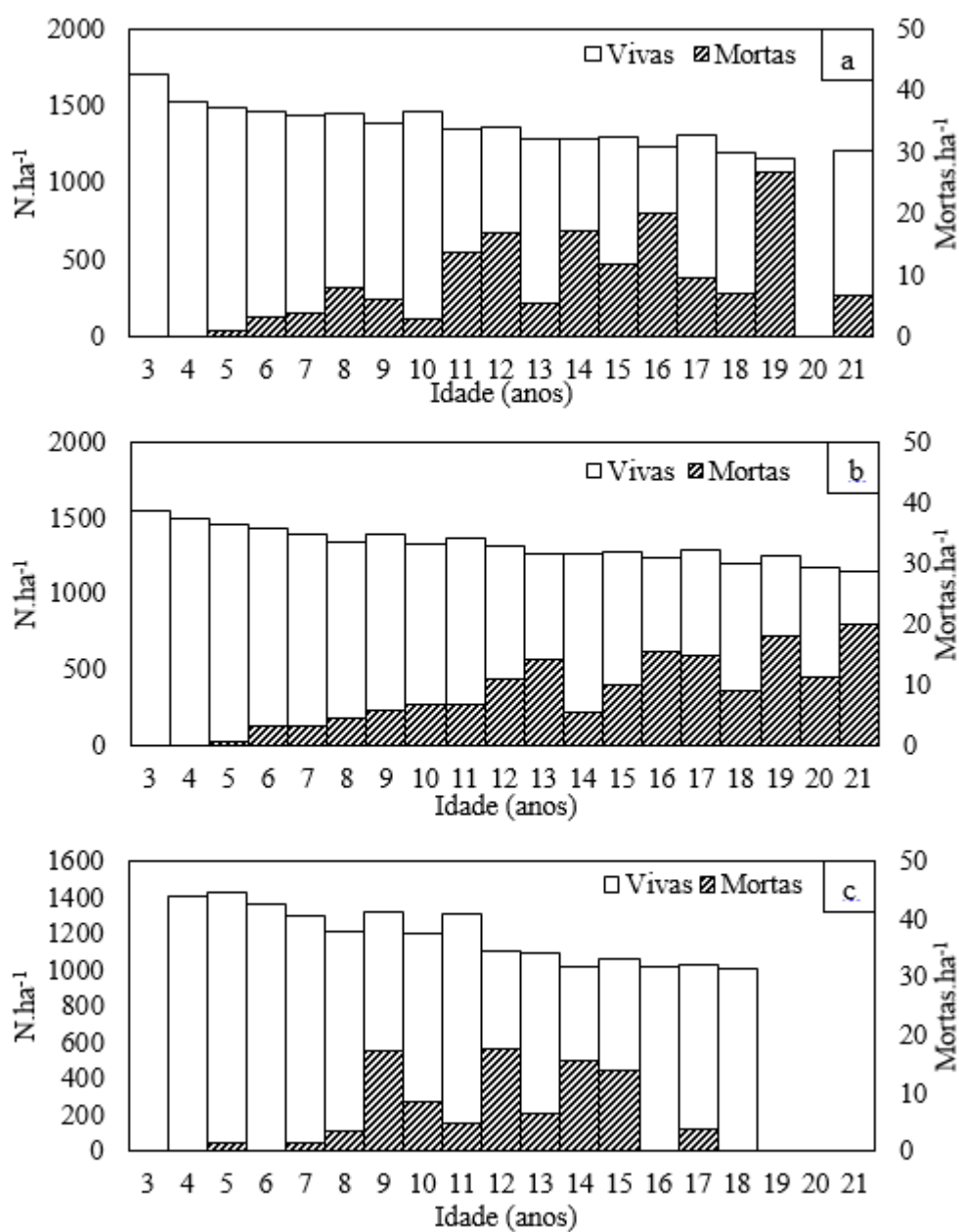


FIGURA 3.1 - NÚMERO DE ÁRVORES VIVAS E MORTAS POR HECTARE E POR IDADE, PARA (a) SÍTIO I (30,5 m), (b) SÍTIO II (25,5 m) E (c) SÍTIO III (20,5 m), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

De acordo com a Figura 3.1, em todos os casos foi observada tendência de decréscimo no número de árvores vivas com o avanço da idade, semelhante à observada em Machado (1979) para *P. taeda* e Sanquetta (1990) para *Pinus elliottii* Engelm. Por outro lado, houve aumento da mortalidade de árvores com o decorrer da idade, sendo mais evidente nos sítios I e II, tendência similar àquela descrita em Schneider et al. (2015). De acordo com Zhao et al. (2007), a probabilidade de sobrevivência diminui com o aumento da idade do povoamento e com a classe de produtividade. Em geral, o número de árvores mortas por idade foi maior para o sítio I, evidenciando a existência de maior competição no sítio mais produtivo (MACHADO, 1979), com início antecipado em relação às demais classes de sítio, dada à maior taxa de incremento das variáveis dendrométricas.

Considerando-se que o espaçamento inicial de plantio foi de $2,5 \times 2,5$ m, o que corresponde a 1.600 plantas por hectare, o percentual de sobrevivência aos 18 anos foi de 73, 75 e 63%, para as classes de sítio I, II e III, respectivamente. Apesar de sua ocorrência, a mortalidade regular foi de, no máximo, 2% para algumas idades, em que a maioria assumiu valores inferiores a esse percentual, com média de 1%.

Pequenas oscilações ocorreram devido às mesmas parcelas não serem remedidas ao longo de todo o ciclo do povoamento. Colunas ausentes representam idades as quais não foram representadas na base de dados deste estudo, em que somente a classe de sítio II foi representada em todas as idades. Do total de parcelas empregado neste estudo, em 57% houve casos de mortalidade regular.

Na Figura 3.2 está apresentada a dinâmica do número de árvores vivas e mortas do povoamento (mortalidade regular), para as idades de 5, 10, 15 e 20 anos. Observa-se o avanço nas classes diamétricas com o aumento da idade, tanto para as árvores vivas como as mortas. Na idade de 5 anos, em média, praticamente não houve casos de mortalidade, mas, a partir dos 10 anos, ficaram mais evidentes. Pode ser verificado, ainda, que a mortalidade ocorreu somente nas classes iniciais, como esperado, por se tratarem de árvores dominadas e que sofrem maiores efeitos da competição.

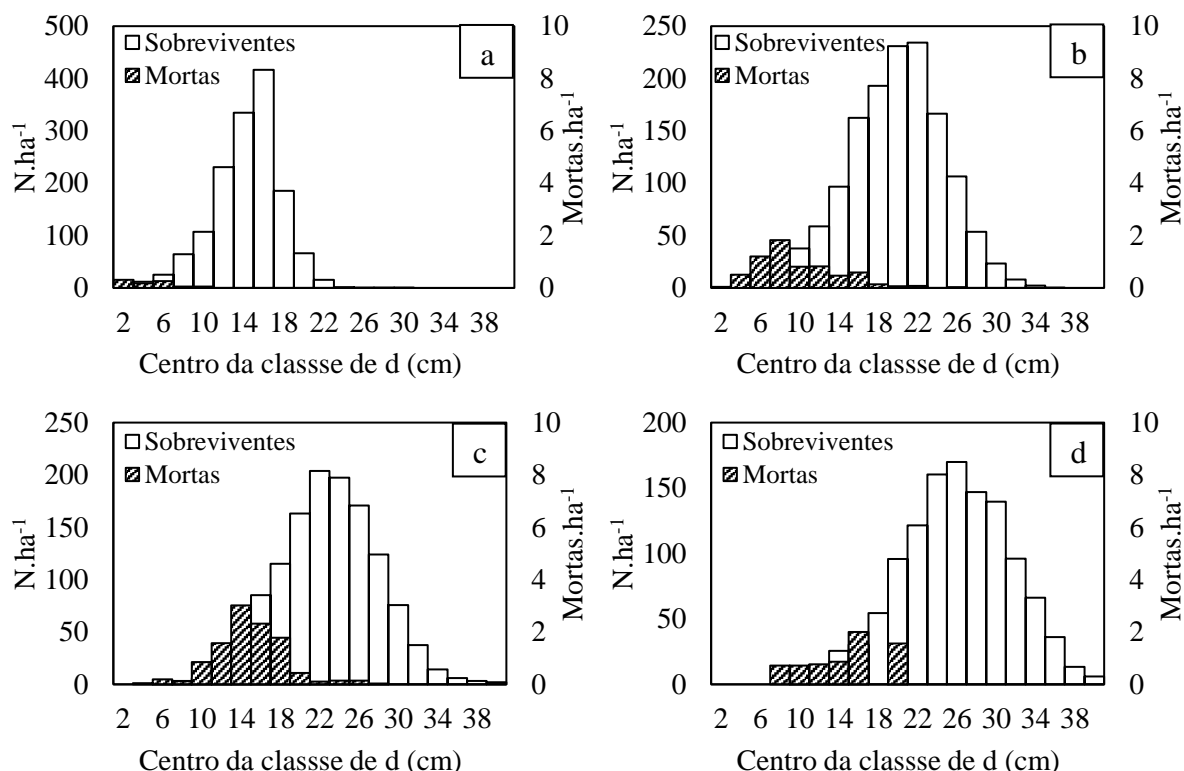


FIGURA 3.2 - DINÂMICA DO NÚMERO DE ÁRVORES SOBREVIVENTES E MORTAS POR HECTARE E POR CLASSE DE DIÂMETRO, EM QUE (a) 5 ANOS, (b) 10 ANOS, (c) 15 ANOS E (d) 20 ANOS, EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Por meio de análises nos dados, pôde ser verificado que a mortalidade ocorreu até a classe de 28 cm, sendo que, após essa classe, não foram constatadas ocorrências de mortalidade. Como forma de determinar a região que houve ocorrência de mortalidade, foi analisada a relação entre o diâmetro máximo em que foi registrada mortalidade e o diâmetro médio aritmético da parcela. Dessa forma, foi observado que, em média, a área de ocorrência de mortalidade de árvores se situou entre o diâmetro mínimo e 75% do diâmetro médio aritmético da parcela. O emprego de apenas um percentual para o povoamento se deu devido os resultados terem sido muito próximos nas diferentes classes de sítio.

Como exemplo, na Figura 3.3 está apresentada uma distribuição diamétrica simétrica hipotética, onde está indicada a área de ocorrência de mortalidade. A linha pontilhada indica o diâmetro médio aritmético da parcela, e a área em destaque representa a região de ocorrência média da mortalidade, que é até 75% desse diâmetro médio.

Essas análises foram essenciais para a determinação das condições em que as equações de probabilidade de mortalidade devem ser aplicadas. Com isso, evitou-se problemas em superestimar essa variável.

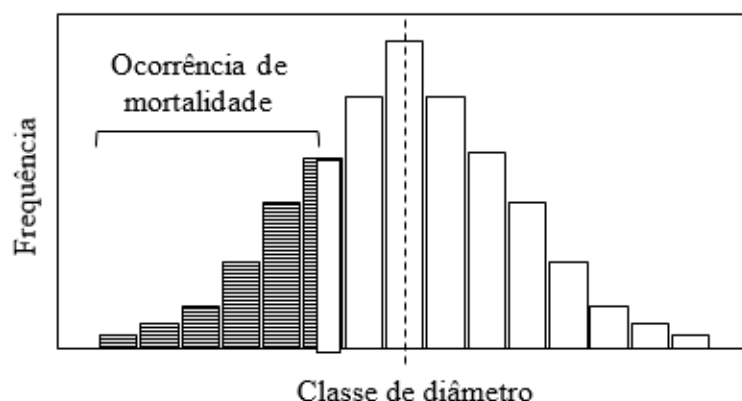


FIGURA 3.3 - ÁREA DE OCORRÊNCIA DE MORTALIDADE REGULAR PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

3.2 ANÁLISE QUALITATIVA DO POVOAMENTO

Conforme mencionado anteriormente, a mortalidade regular do povoamento em estudo apresentou média de 1%, com valor máximo de 2%. Por outro lado, o percentual de árvores sobreviventes na idade de 18 anos foi de 73, 75 e 63%, para as classes de sítio I, II e III, respectivamente.

Diante desses resultados, tornou-se relevante a análise de outras causas que influenciaram a redução do percentual de árvores vivas com o avanço da idade. Vários são os fatores que podem influenciar na redução do número de árvores do povoamento, associados à mortalidade irregular. Além das falhas de plantio, as quais não foram consideradas nessa análise, outros fatores observados no povoamento em estudo foram árvores caídas, atacadas por macaco-prego e derrubadas por ventos. Na Figura 3.4 estão apresentados os percentuais para cada um, assim como o desvio padrão para árvores submetidas ao ataque de macaco-prego, para as três classes de sítio.

As árvores caídas se referiram àquelas com problemas no sistema radicular ou outro motivo, que não fosse queda ocasionada por ventos. Esse percentual apresentou-se semelhante para todas as classes de sítio, em 2%, indicando homogeneidade em sua ocorrência (FIGURA 3.4.A). O percentual de quedas de árvores provocadas pela ação de ventos foi maior no sítio mais produtivo, de 3%, o que era previsto, considerando o maior crescimento em altura total nessa classe, o que aumenta a susceptibilidade dessas árvores a ventanias. Para as demais classes de sítio, os percentuais foram iguais, sendo 1%.

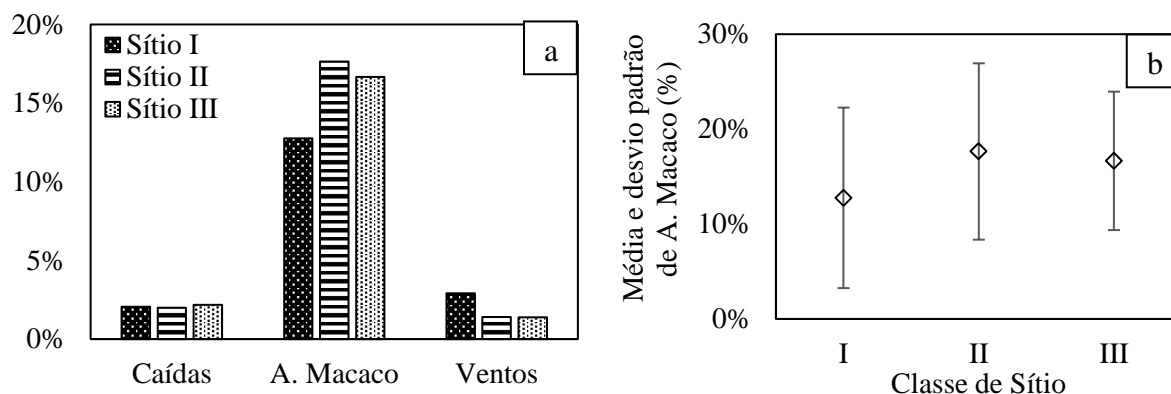


FIGURA 3.4 - PERCENTUAL DE ÁRVORES CAÍDAS, ATACADAS POR MACACO-PREGO E DERRUBADAS POR AÇÃO DE VENTOS (a) E DESVIO PADRÃO DO PERCENTUAL DE ÁRVORES ATACADAS POR MACACO-PREGO (b), PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Dentre os fatores analisados, o percentual de árvores atacadas por macaco-prego foi maior, independentemente da classe de capacidade produtiva. Para o sítio II, esse valor foi de 18%, seguido pelo III com 17% e o I com 13%. Em alguns casos, esse percentual foi superior, como pode ser observado a partir do desvio padrão (FIGURA 3.4.b).

Os danos ocasionados pelo macaco-prego podem ser relevantes, sobretudo se houver o anelamento do fuste no local atacado, o que compromete muito o crescimento ou mesmo a sobrevivência da árvore, pois interrompe o fluxo de água e nutrientes, além de expor uma área maior do câmbio à ação de microrganismos (SOBENKO; OLIVEIRA; LIEBSCH, 2012). Esse efeito é acompanhado pela quebra da ponteira, o que leva à quase total estagnação do crescimento do fuste (LIEBSCH et al., 2015).

Esses resultados foram importantes para explicar melhor as causas da mortalidade de árvores no povoamento em estudo. Os resultados demonstraram que o principal agente da mortalidade de árvores se referiu a fatores catastróficos associados à mortalidade irregular, a qual é mais difícil de se prever. Apesar desse percentual expressivo, a presente pesquisa se concentrou apenas na modelagem da mortalidade regular.

Na maioria dos estudos de crescimento e produção, apenas a mortalidade regular é modelada. Entretanto, alguns modelos estimam tanto a mortalidade regular quanto a irregular (WEISKITTEL et al., 2011). Porém, uma vez que a mortalidade é um fenômeno complexo no processo de crescimento do povoamento, há uma dificuldade expressiva em estimar, com precisão, a mortalidade resultante da combinação entre aquela proveniente da competição intraespecífica e aquela ocasionada por eventos catastróficos (ZHANG; AMATEIS; BURKHART, 1997).

3.3 MODELOS DE MORTALIDADE

Os valores de correlação de Spearman entre a probabilidade de mortalidade e os índices de competição IC.1; IC.2; IC.3; IC.4; IC.5; IC.6; IC.7; e IC.8 foram de -0,16; 0,13; -0,12; -0,11; -0,12; 0,09; -0,13; e -0,12, respectivamente, sendo todas as correlações significativas a 5%. Com exceção dos índices IC.2 e IC.6, as correlações foram negativas, indicando que a probabilidade de mortalidade da árvore foi maior quanto maior foi o valor do índice.

As três maiores correlações foram observadas para os índices IC.1 ($d_1^2 q^{-2}$), IC.2 ($\sum_{i=1}^n g_i$) (STAGE, 1973) e IC.7 ($d_i d_{\max}^{-1}$) (TOMÉ; BURKHART, 1989), nessa ordem, em que d_i é o diâmetro à altura do peito da árvore-objeto (cm); d_{\max} representa o diâmetro à altura do peito máximo da unidade amostral (cm); q é o diâmetro quadrático das árvores da unidade amostral (cm); e g_i é a área transversal das árvores maiores à árvore-objeto (m^2). Desta forma, esses foram os três índices de competição testados como variáveis independentes nos modelos de probabilidade de mortalidade.

Na Tabela 3.2 estão apresentados os coeficientes estimados e estatísticas de avaliação para os modelos avaliados. Os coeficientes β_4 do modelo exponencial e índices de competição IC.1 e IC.2 foram não significativos, demonstrando que a presença da variável altura média da classe não contribuiu significativamente para a estimativa da probabilidade de mortalidade. Os demais coeficientes foram significativos a 5%.

Em todos os casos, o erro padrão da estimativa para a variável probabilidade de mortalidade apresentou-se muito elevado, resultado esperado considerando o excesso de valores “zero” nas observações, uma vez que houve mais casos de não mortalidade à existência de mortalidade nas classes diamétricas. Conforme a estatística VA, ambos os modelos logísticos subestimaram a probabilidade de mortalidade. Por outro lado, os valores em módulo dessa estatística indicaram que não houve diferença entre os modelos testados. Diante dos resultados, os modelos considerados como os de melhores performances foram o melhor modelo exponencial (modelo 3) e o melhor de Buchman (modelo 4), empregando os índices IC.1 e IC.7, respectivamente.

TABELA 3.2 - COEFICIENTES ESTIMADOS E ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE PROBABILIDADE DE MORTALIDADE, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Nº.	Modelo	IC	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	$S_{yx(Pm)} \%$	VA	VAM
1	Logístico (a)	IC.1	2,6780*	2,8589*	-	-	-	-	-	-	447,76	-0,0010	0,02
		IC.2	6,9639*	-1,2229*	-	-	-	-	-	-	426,54	-0,0017	0,02
		IC.7	2,1082*	4,2328*	-	-	-	-	-	-	449,82	-0,0015	0,02
2	Logístico (b)	IC.1	-6,0510*	-2,6131*	0,0826*	0,0352*	0,2051*	-1,1440*	0,0337*	-	393,32	-0,0013	0,02
		IC.2	-6,4157*	-0,0386*	-0,0500*	0,0434*	0,2600*	-1,1526*	0,0519*	-	394,19	-0,0018	0,02
		IC.7	-5,0310*	-5,6926*	0,1197*	0,0726*	0,1603*	-1,2335*	0,0294*	-	392,04	-0,0013	0,02
3	Exponencial	IC.1	-0,0028*	-5,8078*	-2,0264*	0,0853*	0,0142 ^{ns}	0,1834*	-0,8913*	0,0377*	395,44	0,0000	0,02
		IC.2	-0,0043*	-6,0870*	-0,0177*	-0,0262*	0,0163 ^{ns}	0,2321*	-0,7921*	0,0535*	397,47	0,0000	0,02
		IC.7	-0,0033*	-4,8393*	-4,6642*	0,1080*	0,0408*	0,1359*	-0,8930*	0,0326*	396,27	0,0000	0,02
4	Buchman	IC.1	-0,0020*	5,9887*	2,3015*	-0,2076*	-0,0685*	1,0608*	-0,0345*	-0,0327*	393,14	0,0000	0,02
		IC.2	-0,0031*	6,2575*	0,0585*	-0,2574*	0,0524*	0,9950*	-0,0518*	-0,0408*	393,77	0,0000	0,02
		IC.7	-0,0021*	5,0000*	5,3272*	-0,1623*	-0,1095*	1,1327*	-0,0295*	-0,0677*	391,83	0,0000	0,02

Em que: IC_i = índice de competição, em que IC.1 corresponde ao BAI ($d_i^2 q^{-2}$), IC.2 refere-se ao BAL ($\sum_{i=1}^n g_i$), e IC.7 representa o índice de Tomé e Burkhart ($d_i d_{max}^{-1}$);

$S_{yx(Pm)} \%$ = erro padrão da estimativa percentual para a variável probabilidade de mortalidade; VA = viés absoluto; VAM = viés absoluto em módulo; β_i = coeficientes estimados; * e ^{ns} = coeficiente significativo e não significativo, respectivamente, a 5% de significância estatística.

Calculando o erro padrão da estimativa para o número de árvores mortas por hectare ($S_{yx} (N.mortas)$), tanto para o modelo exponencial (IC.1) quanto para o de Buchman (IC.7), os valores foram inferiores àqueles da Tabela 3.2, sendo de 128,4% e 159,7%, respectivamente.

Na Figura 3.5 pode ser observada a dispersão dos resíduos para as estimativas do número de árvores mortas por hectare, em função da idade, para o modelo exponencial (a) e de Buchman (b). Ambos os modelos apresentaram tendência semelhante, os quais superestimaram o número de árvores mortas por hectare, principalmente em idades mais avançadas, e em maior intensidade para o modelo de Buchman.

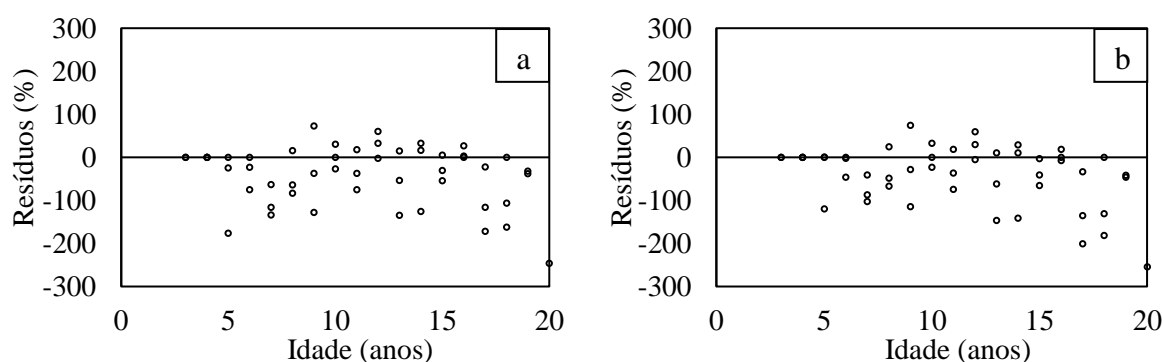


FIGURA 3.5 - DISPERSÃO RESIDUAL PARA A ESTIMATIVA DO NÚMERO DE ÁRVORES MORTAS POR HECTARE EM FUNÇÃO DA IDADE, PARA O MODELO EXPONENCIAL (a) E DE BUCHMAN (b), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Tanto o modelo exponencial quanto o modelo de Buchman foram empregados para estimar o número de árvores mortas por hectare, para cada classe de sítio, como pode ser observado na Figura 3.6. Para o sítio I, percebe-se tendência de subestimação do número de árvores nas primeiras idades, passando para superestimação a partir dos 17 anos, para o ambos os modelos. Em geral, para a classe de sítio II, ocorreu tendência de superestimação, para os dois modelos testados. Finalmente, dada à uma distribuição mais irregular da mortalidade no sítio III, as estimativas não apresentaram uma tendência definida, porém, demonstraram um comportamento similar às observações.

Conforme Eid e Tuhus (2001), o maior desafio dos modelos de mortalidade está em estimar satisfatoriamente sua probabilidade, sobretudo nos estágios iniciais e finais de crescimento. De acordo com Martins (2011), isso é resultado da falta de uma tendência característica da mortalidade em função da idade.

Embora os valores obtidos pelos dois modelos em avaliação se apresentaram similares, percebe-se que o número de árvores mortas por hectare estimado pelo modelo de Buchman se

distanciou mais dos respectivos valores observados, sobretudo para a classe de sítio I, em que ocorreram superestimativas. Assim sendo, o modelo exponencial, empregando o índice de competição IC.1 (BAI), foi o selecionado para estimar a mortalidade regular do povoamento em estudo.

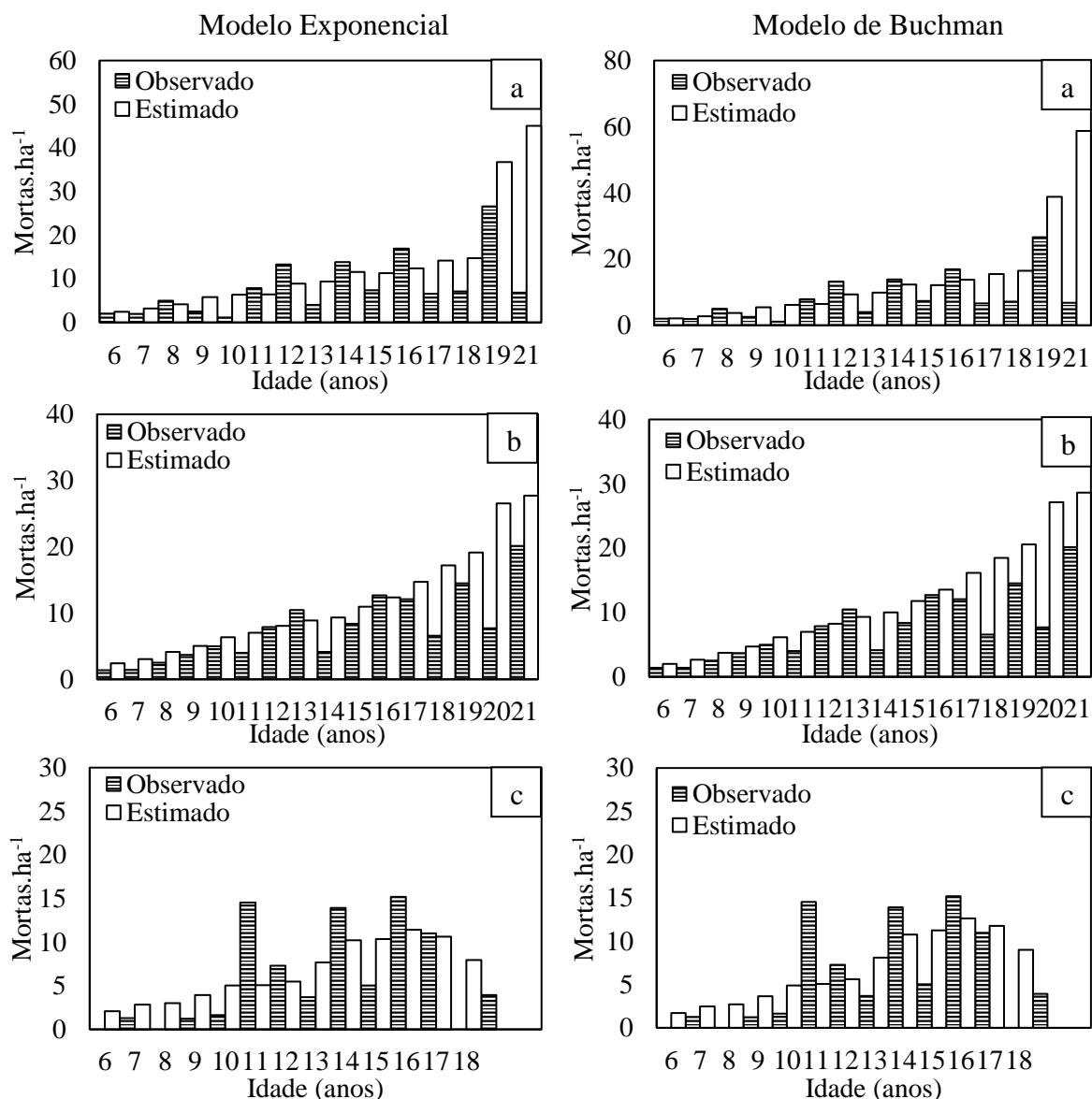


FIGURA 3.6 - VALORES OBSERVADOS E ESTIMADOS DO NÚMERO DE ÁRVORES MORTAS POR HECTARE, PARA O MODELO EXPONENCIAL E DE BUCHMAN, PARA O (a) SÍTIO I (30,5 m), (b) SÍTIO II (25,5 m) E (c) SÍTIO III (20,5 m), PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Glover e Hool (1979) também empregaram o índice de área basal (BAI) no desenvolvimento de um modelo geral de mortalidade de árvores individuais de *P. taeda*, com base na função Weibull, utilizando características das árvores e do povoamento. Os dados foram provenientes de um experimento de adubação nitrogenada, situado no estado americano

de Alabama. Esses autores concluíram que o modelo estimou satisfatoriamente a mortalidade do povoamento.

West (1981) desenvolveu uma função de mortalidade baseada naquela desenvolvida por Glover e Hool (1979), empregando também o índice de área basal (BAI), para espécies de eucaliptos, com idade de 14 a 83 anos. Os dados foram obtidos em uma área localizada na Tasmânia, Austrália. Esse autor conclui que o modelo foi adequado, gerando estimativas precisas da distribuição diamétrica dos povoamentos.

Os resultados podem sugerir a utilização de um percentual fixo para a mortalidade regular, em torno de 1%. Inclusive, em alguns modelos para povoamentos bem manejados, a mortalidade causada por fatores naturais foi desprezada. Como exemplo, Salles (2010) modelou o crescimento e a produção para eucaliptos clonais de 20 a 95 meses de idade, provenientes de um sistema agroflorestal situado no município de Paracatu, região noroeste do estado de Minas Gerais. O modelo de árvores individuais independente da distância foi composto pelos submodelos para projeção do diâmetro e altura, e outro para estimar o volume, porém, não foi realizada a modelagem da mortalidade. Novaes (2009) estudou o crescimento e produção para povoamentos de *Tectona grandis* L. f. Como o povoamento foi desbastado e os dados provenientes de análise de tronco, esse autor considerou sobrevivência de 100%, sob a pressuposição de que a mortalidade regular foi antecipada pela aplicação do segundo desbaste.

Conforme Campos e Leite (2013), para um único espaçamento e regime de corte, taxas de mortalidade insignificantes podem ser ignoradas na modelagem em nível de árvores individuais. Entretanto, na maior parte dos casos, a desconsideração da mortalidade regular é irreal. Isso porque a mesma pode ser desconsiderada somente naqueles casos em que os povoamentos são manejados com rotações muito curtas, com excelentes condições ambientais e subestocados (SCHNEIDER et al., 2005).

4 CONCLUSÕES

A mortalidade de árvores se situou nas classes inferiores de diâmetro, de modo que a área de ocorrência da mortalidade regular, baseada na relação entre o diâmetro máximo de ocorrência de mortalidade com o diâmetro médio aritmético da parcela, foi útil para determinar as condições para aplicação da função de mortalidade.

A mortalidade do povoamento em estudo relacionou-se, em grande parte, à mortalidade irregular, sobretudo àquela provocada por ataque de macaco-prego. Por outro lado, a mortalidade regular apresentou pouca expressividade.

Conforme as estimativas geradas, o modelo exponencial foi aquele que melhor estimou o número de árvores mortas por hectare, para as três classes de sítio. No entanto, tornam-se necessários estudos que considerem a estimativa conjunta da mortalidade regular e a irregular.

REFERÊNCIAS

- AVILA, O. B.; BURKHART, H. E. Modeling survival of loblolly pine trees in thinned and unthinned plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v.22, n.12, p.1.878-1.882, 1992. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x92-245>
- BUCHMAN, R. G.; PEDERSON, S. P.; WALTERS, N. R. A tree survival model with application to species of the Great Lakes region. **Canadian Journal of Forest Research**, v.13, n.4, p.601-608, 1983. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x83-087>
- BUFORD, M. A.; HAFLEY, W. L. Probability distributions as models for mortality. **Forest Science**, v.31, n.2, p.331-341, 1985.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013. 605p.
- CAO, Q. V. A Method to distribute mortality in diameter distribution models. **Forest Science**, v.43, n.3, p.435-442, 1997.
- CAO, Q. V. Prediction of annual diameter growth and survival for individual trees from periodic measurements. **Forest Science**, v.46, n.1, p.127-131, 2000.
- CAO, Q. V.; STRUB, M. Evaluation of four methods to estimate parameters of an annual tree survival and diameter growth model. **Forest Science**, v.54, n.6, p.617-624, 2008.
- CASTEL-BRANCO, D. A. A. S. **Análise da mortalidade em plantações jovens de sobreiro (*Quercus suber* L.) e sua relação com a qualidade da estação**. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) – Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2014.
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem de árvore individual para uma floresta estacional Semidecidual utilizando redes neurais**. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- DOBBERTIN, M.; BIGING, G. S. Using the non-parametric classifier CART to model forest tree mortality. **Forest Science**, Bethesda, v.44, n.4, p.507-516, 1998.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 706p.
- EID, T.; TUHUS, E. Models for individual tree mortality in Norway. **Forest Ecology and Management**, v.154, n.1-2, p.69-84, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00634-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00634-4).

FLEWELLING, J. W.; MONSERUD, R. A. Comparing methods for modelling tree mortality. In CROOKSTON, N. L., HAVIS, R. N. (Eds.), **Second Forest Vegetation Simulator Conference**, Fort Collins, Colorado, 2002. p.168–177.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v.25, n.2, p.275-282, 1979.

HAMILTON, D. A. A logistic model of mortality in thinned and unthinned mixed conifer stands of northern Idaho. **Forest Science**, v.32, n.4, p.989-1.000, 1986.

LEE, Y. J. Predicting mortality for even-aged stands of lodgepole pine. **The Forestry Chronicle**, v.47, n.1, p.29-32, 1971. DOI: <http://dx.doi.org/10.5558/tfc47029-1>

LIEBSCH, D.; MIKICH, S. B.; OLIVEIRA, E. B.; MOREIRA, J. M. M. A. P. Descascamento de *Pinus taeda* por macacos-prego (*Sapajus nigritus*): tipos e intensidades de danos e seus impactos sobre o crescimento das árvores. **Scientia Forestalis**, v.43, n.105, p.37-49, 2015.

LIN, J. Y. Stand growth simulation models for Douglas-fir and western hemlock in the northwest United States. In: FRIES, J. (Ed.). **Growth models for tree and stand simulation**. Royal College of Forestry, Research Notes No. 30, Stockholm. 1973. p.102-118.

MABVURIRA, D.; MIINA, J. Individual-tree growth and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, v.161, n.1-3, p.231-245, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00494-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00494-7)

MACHADO, S. A. Estimativa de sobrevivência de *Pinus taeda* em plantios homogêneos. **Floresta**. v.10, n.1, p.73-75, 1979.

MACHADO, S. A.; TONON, A. E. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; OLIVEIRA, E. B. Comportamento da mortalidade natural em bracatingais nativos em diferentes densidades iniciais e classes de sítio. **Ciência Florestal**, v.12, n.2, p.41-50, 2002.

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.9, p.1.089-1.098, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011000900017>

MIRANDA, R. C.; CAMPOS, J. C. C.; PAULA NETO, F.; OLIVEIRA, L. M. Predição da mortalidade regular para eucalipto. **Revista Árvore**, v.13, n.2, p.152-173, 1989.

MONSERUD, R. A. Simulation of forest tree mortality. **Forest Science**, v.22, n.4, p.438-444, 1976.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Modelling individual tree mortality for Austrian forest species. **Forest Ecology and Management**, v.113, n.2-3, p.109–123, 1999. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00419-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00419-8)

MÔRA, R. **Funções de afilamento de forma variável e modelagem de efeitos mistos em fustes de *Pinus taeda* e *Eucalyptus saligna***. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MOSER, J. W. Dynamics of an uneven-aged forest stand. **Forest Science**, v.18, n.3, p.184-191, 1972.

MURTA JÚNIOR, L. S.; OLIVEIRA, M. R. L.; NOGUEIRA, G. S.; LEITE, H. G.; CASTRO, R. V. O.; ABRAHÃO, C. P. Avaliação do método da similaridade de perfis na estimação do volume de árvores. **Scientia Forestalis**, v.43, n.106, p.435-444, 2015.

NETER, J.; MAYNES, E. S. On the appropriateness of the correlation coefficient with a 0, 1 dependent variable. **Journal of the American Statistical Association**, v.65, n.330, 501-509, 1970. DOI: <http://dx.doi.org/10.2307/2284562>

NOVAES, D. M. **Modelagem de crescimento e produção de povoamentos de *Tectona grandis* L.f. a partir de análise de tronco**. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

ORELLANA, H. **Sucessão florestal, regimes de manejo e competição avaliados por modelos de árvore individual em um fragmento de Floresta de Araucária**. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PAYANDEH, B. Some applications of nonlinear regression models in forest research. **The Forestry Chronicle**, v.59, n.5, p.244-248, 1983. DOI: <http://dx.doi.org/10.5558/tfc59244-5>

PUKKALA, T.; LAHDE, E.; LAIHO, O. Growth and yield models for uneven-sized forest stands in Finland. **Forest Ecology and Management**, v.258, n.3, p.207-216, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.03.052>

SALLES, T. T. **Modelagem de crescimento e produção de clones de eucalipto em um sistema agroflorestal**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SANQUETTA, C. R. **Predição da sobrevivência em reflorestamentos de *Pinus elliottii* Engelm.** 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1990.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. S. P.; FLEIG, F. D.; CUNHA, T. A. Influência do espaçamento no autodesbaste de povoamento monoclonal de *Eucalyptus saligna* Smith. **Ciência Florestal**, v.25, n.1, p.119-126, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/1980509817468>

SCHNEIDER, P. R.; FORTES, F. O.; SOUZA, L. H. S.; LÚCIO, A. D.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. S. P. Análise da mortalidade de *Acacia mearnsii* De Wild. **Ciência Florestal**, v.15, n.2, p.137-143, 2005.

SIMS, A.; KIVISTE, A.; HORDO, M.; LAARMANN, D.; GADOW, K. von. Estimating tree survival: a study based on the Estonian Forest Research Plots Network. **Annales Botanici Fennici**, v.46, n.4, p.336-352, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.5735/085.046.0409>

SOBENKO, L. R.; OLIVEIRA, E. B.; LIEBSCH, D. Danos provocados por macaco-prego em povoamentos de *Pinus* spp. In: EVINCI – EMBRAPA, 2012, Curitiba. XI Evento de Iniciação Científica da Embrapa Florestas, 2012.

STAEBLER, G. R. **Gross yield and mortality tables for fully stocked stands of Douglas-fir**. U.S. Forest Serv. Pacific Northwest Forest and Range Expt. Sta. Res. Paper 14, Portland, Oregon. 1955. 20p.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137. 1973. 32p.

TECK, R. M.; HILT, D. E. **Individual-tree probability of survival model for the Northeastern United States**. Res. Rep. NE-642. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station. 10p. 1990.

THAPA, R. **Modeling Mortality of Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Plantations**. 187 f. Thesis (Philosophy in Forestry) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2014.

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. **Forest Science**, v.35, n.3, p.816-831, 1989.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312p.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW, J. A. J.; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Oxford: John Wiley & Sons, 2011. 415p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119998518>

WEST, P. W. Simulation of diameter growth and mortality in regrowth eucalypt forest of southern Tasmania. **Forest Science**, v.27, n.3, p.603-616, 1981.

YANG, Y.; TITUS, S. J.; HUANG, S. Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. **Ecological Modelling**, v.163, n.3, p.209-222, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00008-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00008-5)

ZHANG, S.; AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E. Constraining individual tree diameter increment and survival models for loblolly pine plantations. **Forest Science**, v.43, n.3, p.414-423, 1997.

ZHAO D.; BORDERS, B.; WANG, M.; KANE, M. Modeling mortality of second-rotation loblolly pine plantations in the Piedmont/Upper Coastal Plain and Lower Coastal Plain of the southern United States. **Forest Ecology and Management**. v.252, n.1-3, p.132-143, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.030>

CAPÍTULO IV

MODELOS DE PROJEÇÃO EM DIÂMETRO E ALTURA PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS DE *Pinus taeda* L.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar e propor modelos para projeção do diâmetro à altura do peito e altura total para árvores individuais de pinus. Os dados foram provenientes de parcelas permanentes de povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L., localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná, com idades de 3,2 a 21,0 anos. Para projetar o diâmetro e altura total, foram testados modelos lineares múltiplos em função da própria variável na idade atual, da idade de projeção, da área basal e do índice de sítio, assim como transformações dessas variáveis. Índices de competição foram avaliados como variáveis independentes nos modelos, cujas contribuições foram verificadas por meio do teste " F_{ci} " de contribuição incremental. Os modelos foram avaliados pelo coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa e boxplots dos resíduos. Conforme as estatísticas de avaliação, os modelos forneceram projeções precisas e livres de tendência. Os índices de competição contribuíram estatisticamente para a projeção do diâmetro e da altura total conforme indicado pelo teste " F_{ci} ", aumentando a precisão dos valores projetados em quase todos os modelos. Os índices de competição com maiores contribuições na modelagem de árvores individuais para projeção do diâmetro e altura total de *P. taeda* foram os índices de Glover e Hool e o de Lorimer, respectivamente.

Palavras-chave: Produção em diâmetro e em altura; crescimento acumulado; modelo linear múltiplo; índices de competição.

CHAPTER IV

DIAMETER AND HEIGHT PREDICTION MODELS FOR INDIVIDUAL *Pinus taeda* L. TREES

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate and propose models to predict diameter at breast height and total height for individual pine trees. Data were obtained from permanent plots unthinned stands of *Pinus taeda* L., located in the region of Telemaco Borba, State of Parana, Brazil, with ages from 3.2 to 21.0 years old. To predict diameter and total height, multiple linear models were tested as a function of the same variable at the current age, prediction age, basal area per hectare and site index, as well as transformations of these variables. Competition indices were evaluated as independent variables in the models, whose contributions were verified by “ F_{ci} ” test of incremental contribution. The fits were evaluated by adjusted coefficient of determination, standard error of estimate and boxplots of residuals. According to the accuracy statistics, the models provided accurate and unbiased predictions. The competition indices statistically contributed to diameter and total height prediction as indicated by “ F_{ci} ” test, increasing the accuracy of predicted values in almost all models. The competition indices with greater contributions in modeling individual trees prediction of diameter and total height of *P. taeda* were the Glover and Hool and Lorimer, respectively.

Keywords: Diameter and height increment; accumulated growth; multiple linear model; competition indices.

1 INTRODUÇÃO

Modelos de árvores individuais possuem grande flexibilidade e caracterizam de maneira precisa o crescimento do povoamento sob diversas condições, fornecendo resultados detalhados (WEISKITTEL et al., 2011) como, por exemplo, sobre a estrutura e dinâmica do povoamento (CLUTTER et al., 1983; ZHANG; AMATEIS; BURKHART, 1997). A compreensão do crescimento das árvores individuais é importante para se conhecer a dinâmica e produtividade da biomassa florestal (COOMES; ALLEN, 2007), assim como planejar o fornecimento de madeira e fornecer subsídios para o gerenciamento florestal (MONSERUD; STERBA, 1996).

Essa categoria pode ser subdividida em modelos dependentes, independentes (MUNRO, 1974) e semi-independentes da distância (STAGE; LEDERMANN, 2008). Tipicamente, modelos independentes da distância consistem em três componentes básicos, sendo uma equação de crescimento em diâmetro, outra para o crescimento em altura e um componente de mortalidade (BURKHART; TOMÉ, 2012). Nesses modelos, o crescimento por árvore é simulado em função de seus atributos, da área basal, da razão de copa, da qualidade do sítio e por uma medida que expresse a competição entre as árvores, como o índice de competição (ZHANG; AMATEIS; BURKHART, 1997; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Geralmente, são empregadas informações relativas ao diâmetro à altura do peito e altura total para cada árvore, as quais são utilizadas na simulação do crescimento, caracterizando-as em função da dimensão e forma, e projetadas ao longo do tempo (CLUTTER et al., 1983). Apesar do crescimento da árvore ocorrer em todos os seus componentes, é dada maior importância nas mudanças no diâmetro e na altura da árvore, uma vez que são mais fáceis de serem mensuradas e pela forte correlação com o volume total da árvore (WEISKITTEL et al., 2011).

Duas abordagens conceituais têm se mostrado úteis para estimar o crescimento da árvore individual. A primeira, a partir da estimativa direta do crescimento empregando a análise de regressão, e a segunda, de forma indireta e robusta, pela utilização de uma função modificadora do crescimento potencial (VANCLAY, 1994; PRETZSCH, 2009; WEISKITTEL et al., 2011). A desvantagem dessa segunda está relacionada à dificuldade em estimar o incremento potencial e, conseqüentemente, diversas aproximações são utilizadas (WEISKITTEL et al., 2011). Martins (2011) relatou que não há confirmação da superioridade das funções modificadoras em relação às equações de regressão.

O aumento do tamanho do fuste pode ser modelado em função do incremento em diâmetro, incremento em área transversal, do diâmetro futuro ou da área transversal futura

(VANCLAY, 1994). Nesse sentido, o mesmo autor mencionou que debates são realizados com respeito à preferência em modelar o incremento em área transversal ou em diâmetro, uma vez que a área transversal seria mais correlacionada com o crescimento em volume e apresenta maior coeficiente de determinação. Porém, essa diferença é em virtude da estrutura do erro, implicando em uma relação meramente funcional, contrariamente em superioridade de um modelo sobre o outro (VANCLAY, 1994; WEISKITTEL et al., 2011). Como exemplo, West (1980) não encontrou diferença em empregar diâmetro ou a área transversal para prever o incremento diamétrico em povoamentos de eucaliptos com rotação de 6 anos, localizados no sudeste da Tasmânia, Austrália.

Outra discussão é com relação ao emprego do diâmetro futuro ou o incremento em diâmetro como variável dependente na modelagem. Vanclay (1994) afirmou que o aumento do diâmetro do fuste pode ser expresso tanto por uma função de produção, a qual estima diâmetro futuro, ou como uma função de crescimento, em que é estimado o incremento diamétrico. Isso também recai sobre a estimativa da variável altura. A decisão de modelar o crescimento ou produção, seja para diâmetro ou altura, geralmente é baseada em conveniências ou preferências dos pesquisadores, visto que ambas fornecem estimativas adequadas (CHASSOT, 2009).

Estudos recentes no Brasil foram conduzidos para avaliar o crescimento individual de várias espécies, sendo a maior parte realizada empregando-se a modelagem do incremento ao invés da modelagem da produção. Dentre esses, tem-se como exemplos os trabalhos de Chassot et al. (2011) para araucária (*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze); Mendes et al. (2006), Martins (2011) e Castro (2011) para clones de eucalipto; Santos (2012) para imbuia (*Ocotea porosa* (Nees & Mart.) Barroso); Cunha (2013) para espécies comerciais amazônicas; Orellana (2014) para espécies de uma Floresta Ombrófila Mista; Castro et al. (2014) e Silveira et al. (2015) para espécies de uma Floresta Estacional Semidecidual.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi avaliar e propor modelos de projeção do diâmetro e altura total para árvores individuais de povoamentos de *P. taeda* situados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS

As características da área, a procedência e as informações dos dados empregados nesta pesquisa e estatísticas descritivas para as principais variáveis dendrométricas e do povoamento estão apresentadas no capítulo I.

As classes de sítio foram definidas no capítulo I, empregando-se o método da curva-guia e o modelo de Chapman-Richards, considerando uma idade índice de 18 anos, cuja equação resultante foi $h_{\text{dom}} = 41,224399(1 - e^{-0,061832 I})^{1,156161}$, com erro padrão da estimativa percentual (S_{yx}) igual a 9,5%, em que h_{dom} e I são a altura dominante (m) e idade (anos), respectivamente. Foram consideradas três classes de sítio, sendo a classe I (30,5 m) compreendendo alturas dominantes na idade índice de 28,1 a 33,0 m; a segunda classe (25,5 m) englobando alturas dominantes entre 23,1 a 28,0 m; e a classe III (20,5 m) envolvendo alturas dominantes de 18,0 a 23,0 m, representando as classes de produtividade alta, média e baixa, respectivamente.

Para a estimativa das alturas totais das árvores das parcelas foi utilizado o modelo hipsométrico genérico $h = e^{0,72145 + 0,02395S - 5,90105d^{-1} + 0,72669 \ln I}$, com S_{yx} igual a 6,7%, ajustado no capítulo I, em que h é a altura total (m), S o índice de sítio (m), d e I como descritos anteriormente.

2.2 BASE DE DADOS PARA O AJUSTE DOS MODELOS DE DIÂMETRO E ALTURA

A amplitude das variáveis utilizadas para o ajuste e validação dos modelos para projetar o diâmetro e altura total está sumarizada na Tabela 4.1. Devido à grande variação, as árvores com altura total inferior a 4 m foram desconsideradas. Além disso, para a projeção da altura total, valores discrepantes (*outliers*) foram retirados da base de dados, uma vez que poderiam proporcionar valores projetados imprecisos, sobretudo nas idades iniciais.

Para o ajuste dos modelos, os valores observados de diâmetro e altura por árvore, em uma idade anterior e posterior, foram pareados, considerando apenas medições sucessivas. Assim, caso uma parcela tenha sido medida três vezes, o ajuste foi realizado por meio do pareamento entre a 1ª – 2ª e 2ª – 3ª medições.

TABELA 4.1 - AMPLITUDE DAS VARIÁVEIS EMPREGADAS NO AJUSTE E VALIDAÇÃO DOS MODELOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Modelo	Ajuste					
	Nº Observações	d (cm)	h (m)	I (anos)	G (m².ha⁻¹)	S (m)
Diâmetro	96.036	3,8 a 53,8	4,0 a 30,2	3,4 a 19,5	5,1 a 75,2	18,7 a 36,7
Altura	85.060	5,1 a 53,8				
Validação						
Diâmetro	29.653	4,1 a 39,8	4,0 a 28,9	3,6 a 19,2	6,8 a 73,2	17,5 a 34,9
Altura	29.177	4,8 a 39,8				

Em que: d = diâmetro à altura do peito; h = altura total; I = idade; G = área basal; S = índice de sítio.

2.3 MODELOS DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL

Conforme a matriz de correlação entre variáveis dendrométricas e do povoamento com os índices de competição independentes da distância, apresentada no capítulo II, maiores valores de correlação foram observados para o diâmetro e altura, comparativamente aos respectivos incrementos, sugerindo a utilização de modelos de produção àqueles de incremento. Sendo assim, foram testados e avaliados modelos para a projeção do diâmetro e da altura total.

Variáveis independentes que expressam o tamanho da árvore, seu status competitivo e atributos do povoamento são utilizadas com frequência na modelagem do crescimento de árvores (WYKOFF, 1990; CHOI et al., 2001). Soares e Tomé (1999) testaram, em Portugal, diferentes modelos para estimar o incremento anual em área transversal para *Eucalyptus globulus* Labill. Dentre os modelos avaliados, o melhor foi aquele em que a variável dependente foi obtida em função do diâmetro à altura do peito, por uma medida de dimensão relativa da árvore, área basal por hectare e índice de sítio.

Os modelos para projeção do diâmetro e altura total foram baseados em um modelo cuja produção, em uma idade de interesse (Y_2), se deu em função da variável dependente na idade atual (Y_1), de uma medida de densidade como, por exemplo, a área basal do povoamento, e da qualidade produtiva do lugar, expressa pelo índice de sítio. Sendo assim, foi avaliado o modelo linear múltiplo (1) descrito a seguir.

$$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 Y_1 + \beta_2 I_2 + \beta_3 S + \beta_4 G + \varepsilon_i \quad (1)$$

Em que: Y_1 e Y_2 = variável de interesse (diâmetro ou altura) na idade atual e de projeção, respectivamente (cm se diâmetro, m se altura); I_2 = idade de projeção (anos); S = índice de sítio (m); G = área basal atual por hectare (m².ha⁻¹); β_i = coeficientes a serem estimados; ε_i = erro aleatório do modelo.

Tomé e Burkhardt (1989) e Wykoff (1990) empregaram um modelo linear múltiplo para estimar o crescimento em diâmetro e área transversal para árvores individuais. As estimativas foram em função de variáveis relacionadas ao tamanho da árvore, do status competitivo e da capacidade produtiva do lugar.

Outros quatro modelos foram testados, cujas variáveis dependentes e independentes foram as mesmas descritas anteriormente, porém, modificadas por algum tipo de transformação. As transformações aplicadas foram o produto de duas variáveis ($x_i \cdot x_j$), o inverso (x_i^{-1}), inversa do produto entre duas variáveis ($(x_i \cdot x_j)^{-1}$), logarítmica ($\ln(x_i)$), logarítmica da variável + 1 ($\ln(x_i + 1)$), e o inverso do logaritmo do produto entre duas variáveis ($(\ln(x_i \cdot x_j))^{-1}$), em que x_i e x_j representam duas diferentes variáveis independentes. No total, foram avaliadas 58 variáveis transformadas.

Para a seleção das variáveis a compor os modelos, foi realizada a matriz de correlação de Spearman (5% de significância) entre essas e as variáveis dependentes (diâmetro e altura), ao passo que, escolhida determinada variável ou sua transformação mais correlacionada com a variável dependente, outra variação da mesma não foi empregada. Chassot et al. (2011) realizaram análises de correlação, correlação parcial, covariância e procedimento *Stepwise* para a seleção de variáveis a compor um modelo de produção em diâmetro futuro para *A. angustifolia*, em Floresta Ombrófila Mista, no Rio Grande do Sul. Goes (2012) avaliou 11 diferentes equações para estimar o incremento em altura e diâmetro para *E. globulus* em Portugal, e foram testadas diferentes combinações das variáveis independentes, sendo obrigatório cada uma das possibilidades conter uma variável ou combinação de variáveis de cada categoria.

Além das variáveis mencionadas, foi empregado o índice de competição como variável independente nos modelos para projetar tanto o diâmetro quanto a altura total. Conforme a matriz de correlação entre os índices de competição com o diâmetro e a altura total, apresentada no capítulo II, os índices de competição mais correlacionados com o diâmetro e altura total foram o IC.3 (GLOVER; HOOL, 1979) e IC.6 (LORIMER, 1983), respectivamente. Também, foi visto que os segundos índices mais correlacionados com essas variáveis foram os índices IC.6 e IC.2 (STAGE, 1973 – BAL), respectivamente. Os índices IC.2, IC.3 e IC.6 são calculados por meio das expressões $\sum_{i=1}^n g_i$, $(d_i \bar{d}^{-1})^2$ e $\sum_{j=1}^n d_j d_i^{-1}$, respectivamente, sendo d_i o diâmetro à altura do peito da árvore-objeto (cm); d_j o diâmetro à altura do peito das árvores

competidoras (cm); \bar{d} = média aritmética dos diâmetros à altura do peito das árvores da unidade amostral (cm); g_i = área transversal das árvores maiores à árvore-objeto (m²). Dessa forma, esses índices de competição foram testados como variáveis independentes nos modelos, sendo selecionado aquele que mais contribuiu estatisticamente nas projeções.

Com o intuito de verificar, estatisticamente, a contribuição do índice de competição nos modelos de projeção do diâmetro e da altura total, foi calculada a contribuição marginal ou incremental, baseada na análise de variância, por meio do teste “F_{ci}” (GUJARATI; PORTER, 2011), dada pela expressão (2).

$$F_{ci} = \left[\frac{(SQE_{novo} - SQE_{antigo})}{n_i} \right] \left[\frac{(SQR_{novo})}{(n - p_{novo})} \right]^{-1} \quad (2)$$

Em que: F_{ci} é o teste de contribuição incremental; SQE_{antigo} é a soma de quadrados da regressão do modelo velho, ou seja, sem a inclusão da nova variável independente; e SQE_{novo} é a soma de quadrados da regressão do modelo novo, isto é, com a inclusão da nova variável dependente; SQR_{novo} é a soma de quadrados dos resíduos do modelo com a nova variável independente; n_i é o número de variáveis novas incluídas no modelo; n é o número de observações; e p_{novo} é o número de parâmetros do modelo com a inclusão da nova variável independente.

Em termos práticos, esse teste é indicado quando há dúvidas quanto à viabilidade estatística de se acrescentar uma variável independente, quando já existem outras variáveis independentes no modelo (GUJARATI; PORTER, 2011). O resultado do teste “F_{ci}” foi comparado com o valor tabelado de “F”, correspondente ao número de graus de liberdade do numerador e denominador da razão das somas de quadrados e à significância de 5%. Assim, os modelos foram ajustados sem e com os índices de competição. Esse teste é similar ao teste “F-parcial” utilizado por Tomé e Burkhart (1989), Soares e Tomé (1999), Guedes, Ivanqui e Martins (2001), Ferreira et al. (2007) e Martins et al. (2011).

2.4 AVALIAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos selecionados para projetar o diâmetro e altura total foram lineares múltiplos. Diante disso, para desenvolver as equações foi empregado o método dos mínimos quadrados ordinários. Tanto para a regressão como para a significância dos coeficientes, o nível de significância adotado foi de 5% (p-valor ≤ 0,05). Para avaliar os ajustes, foi empregado o

coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa percentual ($S_{yx}\%$), ambos recalculados para a variável de interesse (DRAPER; SMITH, 1998), e análise gráfica residual por meio de boxplots (KIERNAN; BEVILACQUA; NYLAND, 2008; HÄRKÖNEN et al., 2010).

Para avaliar a precisão dos modelos aplicados à base de dados selecionada para validação, foi utilizada a raiz do quadrado médio do resíduo (RQMR) (REGAZZI, 2003), dada

pela expressão $RQMR\% = 100 \times \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / n \right]^{1/2} / \bar{Y}$, em que RQMR foi calculada em

percentagem, sendo “n” o número de pares de dados, Y_i e \hat{Y}_i os valores observados e estimados, respectivamente.

Para os modelos em que a variável dependente sofreu transformação logarítmica (Ln), antes de se proceder ao recálculo das estatísticas, multiplicou-se a variável projetada pelo fator de correção da discrepância logarítmica de Meyer (FM), conforme metodologia aplicada por Machado et al. (2008). Esse fator é calculado segundo a expressão $FM = e^{0,5S_{yx}^2}$, em que: $e = 2,718281828$ e S_{yx} = erro padrão da estimativa, obtido na unidade da variável dependente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 MODELOS DE DIÂMETRO E ALTURA TOTAL

Por meio da matriz de correlação de Spearman, foram selecionadas as variáveis independentes mais correlacionadas com o diâmetro e altura total. Os modelos resultantes estão apresentados na Tabela 4.2. Tanto o modelo de projeção em diâmetro quanto o de altura total assumiram a mesma relação funcional.

TABELA 4.2 - MODELOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Nº. Modelo	Modelo
3	$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 Y_1^2 + \beta_2 (I_2 S)^{-1} + \beta_3 \text{Ln}(G) + [\beta_4 \text{IC}_i] + \varepsilon_i$
4	$\text{Ln}(Y_2) = \beta_0 + \beta_1 (Y_1 S)^{-1} + \beta_2 \text{Ln}(GI_2) + [\beta_3 \text{IC}_i] + \varepsilon_i$
5	$\text{Ln}(Y_2) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(Y_1) + \beta_2 \text{Ln}[(I_2 S)^{-1}] + \beta_3 \text{Ln}(G) + [\beta_4 \text{IC}_i] + \varepsilon_i$
6	$\text{Ln}(Y_2) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}[(Y_1 S)^{-1}] + \beta_2 \text{Ln}(GI_2) + [\beta_3 \text{Ln}(\text{IC}_i + 1)] + \varepsilon_i$

Em que: Y_1 e Y_2 = variável de interesse (diâmetro e altura) na idade atual e de projeção, respectivamente; I_2 = idade de projeção (anos); S = índice de sítio (m); G = área basal ($\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$); IC_i = índice de competição; ε_i = erro aleatório do modelo.

Os cinco modelos (1, 3, 4, 5 e 6) foram ajustados aos dados e avaliados. Os coeficientes e estatísticas de avaliação dos ajustes dos modelos para projeção do diâmetro estão apresentados na Tabela 4.3. Todos os coeficientes foram significativos a 5%. Os resultados para os ajustes sem o índice de competição foram inferiores àqueles que consideraram o índice, em todas as situações, sendo mais evidente para os modelos 4 e 6. Dentre os modelos que utilizaram o índice de competição como variável independente, aqueles que empregaram o IC_3 apresentaram resultados superiores, o que era esperado, uma vez que maiores correlações foram observadas para esse índice, como visto no capítulo II.

TABELA 4.3 - COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DOS MODELOS TESTADOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Nº.	Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	$S_{yx}\%$	F_{ci}
1	Sem IC	-0,4136*	1,1098*	0,0395*	0,1200*	-0,0927*	-	0,95	5,76	-
	IC.3	-1,0818*	0,9299*	0,0967*	0,1225*	-0,0578*	1,7812*	0,96	5,59	5.904,9*
	IC.6	0,7052*	1,0640*	0,0380*	0,1197*	-0,0804*	-0,0080*	0,96	5,73	694,1*
3	Sem IC	18,3960*	0,0262*	-160,068*	-2,0377*	-	-	0,90	8,59	-
	IC.3	10,1976*	0,0142*	-612,996*	0,4721*	5,1891*	-	0,94	6,67	62.946,0*
	IC.6	19,2756*	0,0184*	-221,303*	0,2108*	-0,0639*	-	0,94	6,69	62.330,0*
4	Sem IC	3,55803*	-293,913*	0,0162*	-	-	-	0,81	11,81	-
	IC.3	2,70403*	-155,798*	0,1060*	0,3309*	-	-	0,92	7,59	365.285,4*
	IC.6	2,34812*	-129,539*	0,1108*	-0,0058*	-	-	0,90	8,51	112.602,0*
5	Sem IC	3,14187*	1,0230*	-0,0714*	-0,2180*	-	-	0,95	5,94	-
	IC.3	0,41214*	0,8370*	-0,1022*	-0,1449*	0,2245*	-	0,95	5,79	49.674,9*
	IC.6	0,36667*	1,1527*	-0,0742*	-0,2855*	0,1272*	-	0,95	5,90	-46,4 ^{ns}
6	Sem IC	0,35458*	-293,913*	0,0162*	-	-	-	0,81	11,81	-
	IC.3	-0,3064*	-121,254*	0,1293*	0,7947*	-	-	0,94	6,82	439.168,6*
	IC.6	3,55803*	-147,001*	0,0989*	-0,5631*	-	-	0,91	8,11	214.720,3*

Em que: Sem IC = modelo ajustado sem o índice de competição; IC.3 = índice de competição (GLOVER e HOOL, 1979), dado pela expressão $(d_i \bar{d}^{-1})^2$; IC.6 = índice de competição (LORIMER, 1983), dado pela expressão $\sum d_j d_i^{-1}$; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa percentual; F_{ci} = teste “F” para contribuição incremental ou marginal; β_i = coeficientes estimados; * coeficientes e teste “ F_{ci} ” significativos a 5%; ^{ns} = teste “ F_{ci} ” não significativo a 5%.

Conforme o teste “ F_{ci} ” (TABELA 4.3), os índices de competição contribuíram estatisticamente nos valores projetados de diâmetro, uma vez que apresentaram valores da estatística “ F_{ci} ” superiores ao respectivo valor tabelado (3,84), com exceção do índice IC.6 para o modelo 4. Valores negativos dessa estatística são possíveis, uma vez que o numerador da expressão do “ F_{ci} ” é composto por uma subtração de somas de quadrados. Nesse caso, a soma de quadrados da regressão do modelo com o índice de competição foi menor à respectiva soma de quadrados do modelo sem esse índice. De acordo com a expressão de cálculo de “ F_{ci} ”, quando o número de observações for alto, essa estatística tende a assumir valores elevados. Isso não aconteceria somente nas situações em que a diferença existente no numerador for muito alta, ou seja, quando a variável adicionada promover aumentos extraordinários na precisão do modelo.

Apesar do resultado desse teste, melhorias na qualidade e na precisão foram mínimas, principalmente para os modelos 1 e 5, com exceção dos modelos 4 e 6. Nesses casos, é provável que um ou outro modelo forneceria resultados similares. Isso pode ser reflexo da alta correlação entre os índices de competição com o diâmetro medido na idade atual, uma vez que esses índices são obtidos em função dessa variável. Além disso, o teste “ t ” indicou que os coeficientes associados aos índices de competição foram significativos nos modelos. Conforme visto na Tabela 4.3, os coeficientes foram todos significativos ($p\text{-valor} \leq 0,05$), e nenhum assumiu valor próximo ao nível de significância estabelecido (0,05), sendo zero ou muito próximo a zero. Conforme Hoffmann e Vieira (1977), se o coeficiente associado a uma variável for estatisticamente diferente de zero, essa deve ser mantida no modelo.

Tomé e Burkhart (1989) empregaram o teste “ F ” parcial para verificar a contribuição de índices de competição em equações para expressar o incremento em diâmetro e em área transversal, para plantios de *E. globulus* em Portugal. Para todos os modelos avaliados, os índices de competição foram significativos como variáveis independentes.

Soares e Tomé (1999) aplicaram o teste “ F ” para avaliar a contribuição de índices de competição dependentes da distância em modelos lineares múltiplos para estimar o incremento anual em área transversal, calculados para *E. globulus*, em Portugal. As autoras observaram grande contribuição dos índices de competição nos modelos.

Martins et al. (2011) empregaram a estatística “ F ” parcial para checar a contribuição estatística do índice de competição IC.1 (BAI) e IC.2 (BAL) em modelos teóricos de crescimento em diâmetro, altura e de probabilidade de mortalidade para povoamentos de clones de eucalipto, no município de Monte Dourado, Pará. A partir dos resultados, o índice

IC.1 foi significativo nos modelos, independentemente da classe de sítio. Por outro lado, o índice IC.2 foi não significativo para o sítio menos produtivo.

Diante dos resultados, o modelo 1, empregando o índice de competição IC.3 $\left(\left(d_i \bar{d}^{-1} \right)^2 \right)$, propiciou os melhores resultados estatísticos. Esse índice foi amplamente recomendando para determinar a competição de povoamentos homogêneos de mesma idade, tamanho e crescimento potencial (DIMOV; CHAMBERS; LOCKHART, 2008).

Chassot et al. (2011) construíram um modelo de produção em diâmetro em função de características dimensionais e sociológicas, além de índices de competição independentes da distância, para *A. angustifolia* em Floresta Ombrófila Mista, no Rio Grande do Sul. Dentre os índices utilizados, foi usado o de Glover e Hool (1979). Os autores concluíram que a estimativa do diâmetro futuro depende apenas do diâmetro atual e da posição sociológica.

Santos (2012) empregou os índices de competição BAL (STAGE, 1973), Hegyi (1974) e o de Glover e Hool (1979) na avaliação do incremento diamétrico, convertido posteriormente para incremento em área transversal, para um povoamento não manejado de imbuia (*O. porosa*), com 44 anos, em Rio Negro, Paraná. O índice de Glover e Hool apresentou alta correlação com o incremento em área transversal (0,89), e proporcionou o desenvolvimento de um modelo de árvore individual mediante uma equação linear.

Aakala et al. (2013) utilizaram índices para avaliar a competição de *Pinus resinosa* e *Pinus strobus* no Norte de Minnesota, Estados Unidos. Esses autores empregaram quatro categorias de índices: dominância relativa, distância independente, distância dependente e polígonos de espaço de crescimento com o diagrama de Voronoi ponderado. Ao analisarem três diferentes subgrupos ecológicos (coortes simples e múltiplas para *P. resinosa* e coortes múltiplas para *P. strobus*), definidos a partir da premissa de que a competição do povoamento pode variar conforme a faixa etária, observaram que o índice de Glover e Hool (1979) foi o que melhor estimou o crescimento nos povoamentos com única coorte para *P. resinosa*. A definição do termo coorte¹ pode ser encontrada em Ebling e Péllico Netto (2015).

Vieira (2015) realizou a projeção do diâmetro e altura de árvores individuais de plantios clonais de eucaliptos, empregando redes neurais artificiais. De acordo com os resultados, o índice de Glover e Hool (1979) foi o mais correlacionado com o crescimento em diâmetro, altura e com a idade, dentre os 5 índices avaliados.

¹ Coortes são unidades demográficas formadas por um grupo de árvores recrutadas em um mesmo intervalo de tempo, promovendo o surgimento de distribuições diamétricas multimodais, que se originam em decorrência de agentes antrópicos e naturais que atuam nos nichos.

Esses resultados demonstram a importância da utilização de índices de competição na modelagem de árvores individuais, indicando que uma variável que expresse o status competitivo contribui de forma estatisticamente significativa na predição de variáveis dimensionais de árvores. De acordo com Sánchez-González et al. (2006), há poucos estudos sobre o comportamento dos índices de competição em modelos de regressão usados na projeção do crescimento e produção de povoamentos florestais.

Para averiguar o comportamento das projeções diamétricas foi elaborado os boxplots dos resíduos por classe de diâmetro atual (FIGURA 4.1). Houve pequena tendência de superestimação dos diâmetros nas classes iniciais. Porém, esses diâmetros se situam em idades muito jovens, abaixo dos 5 anos, as quais, geralmente, não são empregadas como ponto de partida em projeções. Por outro lado, a partir da classe de diâmetro de 10 cm, grande parte dos resíduos se situaram em torno de “zero”, livres de tendências, com poucos valores extremos (*outliers*). Com o avanço das classes diamétricas, a precisão dos valores projetados aumentou, uma vez que ocorreu redução da amplitude de variação. Considerando também os valores extremos, a variação oscilou, em grande parte, entre $\pm 25\%$.

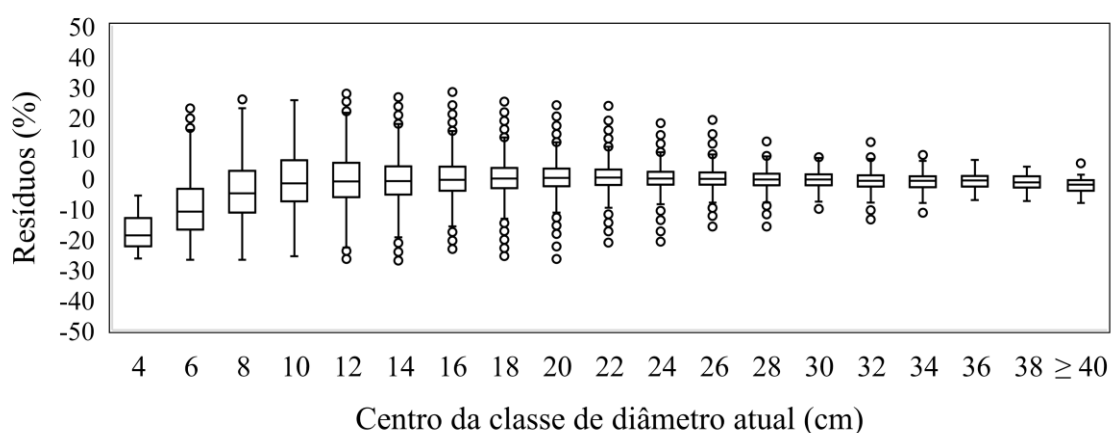


FIGURA 4.1 - BOXPLOTS DOS RESÍDUOS POR CLASSE DE DIÂMETRO ATUAL PARA O MODELO 1 COM ÍNDICE DE COMPETIÇÃO IC.3 PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

As estatísticas de avaliação dos ajustes e os coeficientes estimados para os modelos para projeção da altura total estão apresentados na Tabela 4.4. Assim como para os modelos de projeção do diâmetro, todos os coeficientes foram significativos a 5%. Em termos de coeficiente de determinação ajustado, os modelos de altura total foram superiores em relação àqueles para o diâmetro. Os valores de erro padrão da estimativa oscilaram de 5,91 a 9,93%, com destaque ao modelo 1 empregando o índice IC.6.

TABELA 4.4 - RESULTADOS DOS AJUSTES DOS MODELOS EMPREGADOS PARA PROJETAR A ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Nº.	Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	$S_{yx}\%$	F_{ci}
1	Sem IC	1,2524*	0,7723*	0,2739*	0,0439*	-0,0033*	-	0,96	6,70	-
	IC.2	-0,3142*	0,5433*	0,5242*	0,0954*	0,0370*	-0,6188*	0,97	6,25	12.542,5*
	IC.6	1,1139*	0,3231*	0,6614*	0,1468*	0,0517*	-0,0322*	0,97	5,91	24.214,7*
3	Sem IC	13,3480*	0,0224*	-980,917*	0,4384*	-	-	0,96	7,03	-
	IC.2	12,8898*	0,0215*	-1089,27*	0,9305*	-0,4680*	-	0,96	6,64	10.324,6*
	IC.6	14,7394*	0,0197*	-1057,01*	0,9423*	-0,0256*	-	0,97	5,99	31.889,4*
4	Sem IC	1,33958*	-80,985*	0,2767*	-	-	-	0,92	9,93	-
	IC.2	0,97039*	-65,024*	0,3452*	-0,0604*	-	-	0,93	9,02	36.719,1*
	IC.6	0,76823*	-33,453*	0,3468*	-0,0032*	-	-	0,95	7,70	91.539,0*
5	Sem IC	1,06252*	0,6115*	-0,2913*	-0,0612*	-	-	0,96	6,77	-
	IC.2	-0,2519*	0,4783*	-0,4009*	0,0141*	-0,0906*	-	0,96	6,49	24.109,7*
	IC.6	-0,7211*	0,2034*	-0,5275*	0,1022*	-0,2558*	-	0,97	6,12	-1.134,7 ^{ns}
6	Sem IC	-1,2119*	-0,4235*	0,1997*	-	-	-	0,94	8,46	-
	IC.2	0,0288*	-0,3467*	0,2737*	-0,1293*	-	-	0,95	7,80	30.663,1*
	IC.6	-0,9446*	-0,2628*	0,2729*	-0,2613*	-	-	0,96	6,91	26.474,2*

Em que: Sem IC = modelo ajustado sem o índice de competição; IC.2 = índice de competição (STAGE, 1973 – BAL), dado pela expressão $\sum g_i$; IC.6 = índice de competição (LORIMER, 1983), dado pela expressão $\sum d_j d_i^{-1}$; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa percentual; F_{ci} = teste “F” para contribuição incremental ou marginal; β_i = coeficientes estimados; * coeficientes e teste “ F_{ci} ” significativos a 5%; ^{ns} = teste “ F_{ci} ” não significativo a 5%.

Para todas as ocasiões, a inclusão do índice de competição promoveu ganho em precisão nas projeções, principalmente quando se empregou o índice IC.6 (TABELA 4.4). Esse resultado era esperado dada à maior correlação desse índice com a altura total, em todas as classes de sítio, visto no capítulo II.

De acordo com o teste “F_{ci}”, os índices de competição contribuíram estatisticamente na precisão das projeções, porém, em menor intensidade em relação às equações de projeção do diâmetro. Uma exceção foi o índice IC.6 para o modelo 5, resultado similar ao modelo para projetar o diâmetro. Como mencionado anteriormente, o valor tabelado dessa estatística foi de 3,84. Assim como para a equação para projetar o diâmetro, as observações mencionadas a respeito do teste “F_{ci}” são oportunas para a equação de projeção da altura, cujos p-valores também assumiram valores zero ou muito próximo a zero. Avaliando a contribuição estatística dos índices de competição IC.1 (BAI) e IC.2 (BAL) em modelos de incremento em altura para povoamentos clonais de eucalipto, no município de Monte Dourado, Pará, Martins et al. (2011) observaram que, com exceção do índice IC.2 na classe de sítio média, ambos os índices contribuíram estatisticamente no modelo.

Conforme os resultados, o modelo 1, empregando o índice de competição IC.6 $\left(\sum_{j=1}^n d_j d_i^{-1} \right)$, foi considerado como o mais adequado para projetar a altura total. Outros trabalhos também empregaram o índice de Lorimer na avaliação do incremento de variáveis dendrométricas.

Sob a hipótese de que o crescimento diamétrico de *Pinus sylvestris* L. da Serra de Guadarrama, Espanha, é afetado pela competição entre árvores, García-Abril et al. (2007) caracterizaram e compararam a relação entre o crescimento e competição. Para isso, os autores consideraram quatro diferentes estruturas florestais: floresta regenerada naturalmente de mesma idade; floresta com diferentes idades; uma floresta com sub-bosque de carvalho (*Quercus pyrenaica* Willd.); e um plantio. O efeito da competição foi descrito pelo índice de Lorimer (1983) modificado, uma vez que empregou a área transversal em vez do diâmetro em sua expressão. Esse índice foi utilizado com sucesso para estimar a taxa de crescimento, tanto nas florestas equiâneas quanto nas inequiâneas.

O índice de Lorimer (1983) também foi empregado por Puettmann et al. (2009) na avaliação do crescimento diamétrico em povoamentos adultos submetidos a tratamentos de redução da densidade de abeto-branco (*Abies alba*), situados na Floresta Negra, Alemanha. Os melhores resultados foram obtidos quando se considerou árvores vizinhas no raio de 16 m.

Fraver et al. (2014) empregaram o índice de Hegyi (1974) e o de Lorimer (1983) modificado para avaliar os fatores que afetam o ambiente competitivo de árvores de abeto falso (*Picea abies* (L.) Karst.) da Floresta Boreal da Suécia. A competição entre árvores afetou claramente a taxa de crescimento, sendo o volume da copa a variável que mais contribuiu na competição.

Na Figura 4.2 estão apresentados os boxplots dos resíduos do modelo 1 para projeção da altura total. A amplitude de variação nas menores classes foi semelhante àquela obtida para o modelo de projeção do diâmetro, se situando entre $\pm 25\%$, com exceção da classe de 5 m, que variou entre $\pm 30\%$. Desconsiderando-se os valores extremos, a partir da classe de 9 m houve aumento da precisão dos valores projetados.

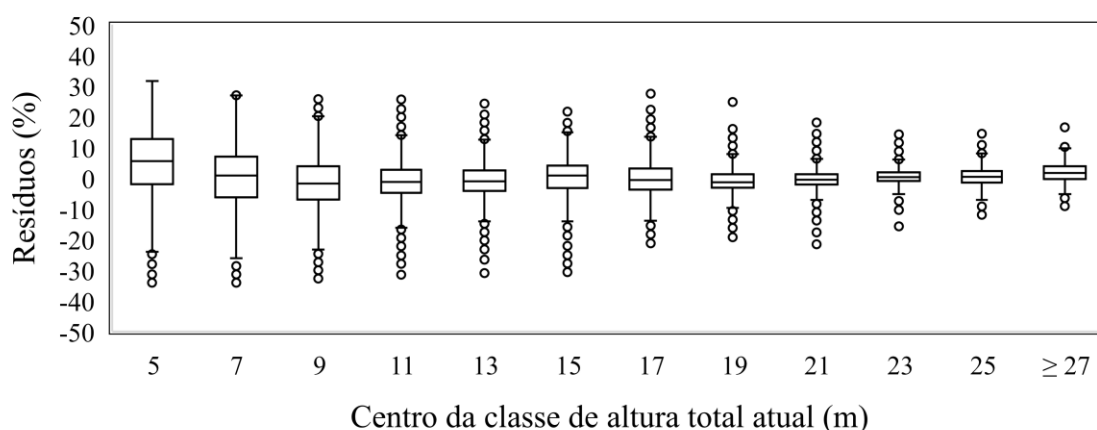


FIGURA 4.2 - BOXPLOTS DOS RESÍDUOS POR CLASSE DE ALTURA TOTAL ATUAL PARA O MODELO 1, COM ÍNDICE DE COMPETIÇÃO IC.6, PARA PROJEÇÃO DA ALTURA TOTAL EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Selecionados os modelos mais adequados para projetar o diâmetro e altura total, os mesmos foram aplicados aos dados selecionados para a validação. As estatísticas de avaliação dos ajustes para ambos os modelos estão apresentadas na Tabela 4.5.

TABELA 4.5 - ESTATÍSTICAS DE AVALIAÇÃO E PRECISÃO DOS MODELOS PARA PROJETER DIÂMETRO E ALTURA TOTAL, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Nº. Modelo	Modelo	IC	RQMR
1	Diâmetro	IC.3	5,50
1	Altura	IC.6	5,98

Em que: IC = índice de competição; IC.3 = índice de competição (GLOVER e HOOL, 1979) dado pela expressão $(d_i \bar{d}^{-1})^2$; IC.6 = índice de competição (LORIMER, 1983), dado pela expressão $\sum d_j d_i^{-1}$; RQMR = raiz do quadrado médio do resíduo, em percentagem.

Os resultados permaneceram similares àqueles obtidos com os dados do ajuste, com sutil superioridade da equação para projetar o diâmetro em relação ao erro padrão da estimativa (TABELA 4.5).

Na Figura 4.3 estão apresentados os boxplots dos resíduos dos modelos de projeção do diâmetro e altura total, aplicados aos dados da validação. A amplitude dos resíduos para o modelo de projeção do diâmetro assemelhou-se muito àquela dos dados do ajuste. O mesmo comportamento foi observado para o modelo de projeção da altura total, com sutil inferioridade na precisão das projeções, dada a uma amplitude maior dos resíduos. Para ambos os modelos, maior precisão foi observada para árvores de maiores dimensões. A menor precisão nas dimensões inferiores, tanto do diâmetro quanto da altura total, pode ser reflexo da variabilidade dos dados, sobretudo nas idades iniciais, como mencionado anteriormente.

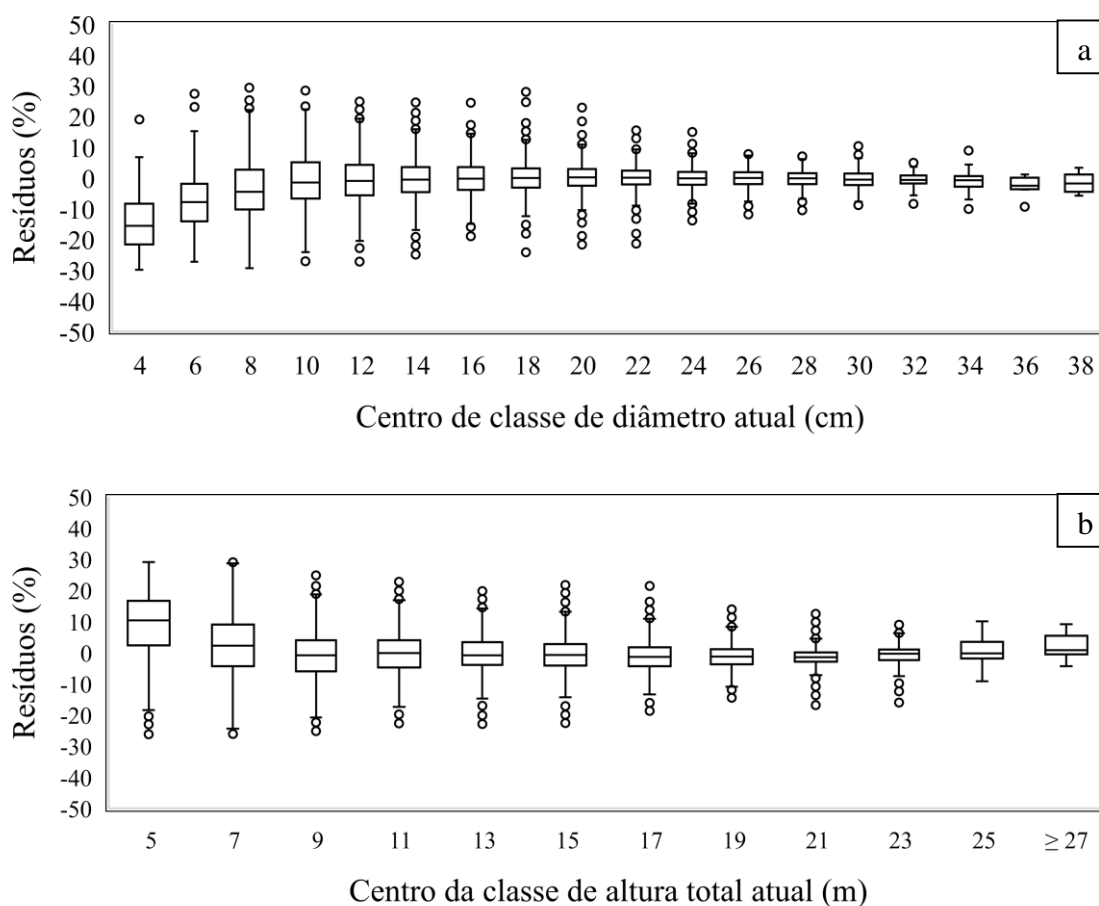


FIGURA 4.3 - BOXPLOTS DOS RESÍDUOS POR CLASSE DE DIÂMETRO ATUAL DOS MODELOS PARA PROJEÇÃO DO DIÂMETRO (a) E POR CLASSE DE ALTURA TOTAL ATUAL DOS MODELOS PARA PROJEÇÃO DA ALTURA TOTAL (b), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Conforme a Figura 4.3, grande parte dos boxplots apresentaram a mediana (linha horizontal dentro do retângulo) centralizada, indicando simetria na distribuição dos resíduos, o que é uma propriedade desejável em modelos de regressão linear (GUJARATI; PORTER, 2011).

Martins (2011) também encontrou dispersões residuais similares à atual pesquisa, com menor amplitude de variação ($\pm 20\%$), ao avaliar modelos de incremento em diâmetro e em altura, para plantios de híbridos de *Eucalyptus grandis* \times *Eucalyptus urophylla*, não desbastados, localizados em Monte Dourado, estado do Pará.

Reyes-Muñoz et al. (2011) ressaltaram a importância dos índices de competição em modelos de crescimento em volume de uma floresta mista de *Pinus* sp. e *Quercus* sp., localizada em Pueblo Nuevo, estado de Durango, México. Ainda, destacaram a importância de medidas de densidade para explicar o crescimento de povoamentos florestais.

4 CONCLUSÕES

Os modelos de diâmetro à altura do peito e em altura total para povoamentos de *P. taeda* localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná, forneceram projeções precisas, em função da própria variável na idade atual, assim como da idade de projeção, área basal e do índice de sítio.

A utilização da área basal, da idade de projeção, do índice de sítio, do índice de competição e da variável medida na idade atual como variáveis independentes nos modelos de diâmetro à altura do peito e altura total foi estatisticamente satisfatória, uma vez que proporcionou projeções precisas.

Os índices de competição com maiores contribuições na modelagem de árvores individuais para projeção do diâmetro e altura total de *P. taeda* foram os índices de Glover e Hool e o de Lorimer, respectivamente.

REFERÊNCIAS

- AAKALA, T.; FRAVER, S.; D'AMATO, A. W.; PALIK, B. J. Influence of competition and age on tree growth in structurally complex old-growth forests in northern Minnesota, USA. **Forest Ecology and Management**, v.308, p.128–135, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.057>
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. New York: Springer, 457p. 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- CASTRO, R.; SOARES, C.; LEITE, H.; SOUZA, A.; MARTINS, F.; NOGUEIRA, G.; OLIVEIRA, M.; SILVA F. Competição em nível de árvore individual em uma Floresta Estacional Semidecidual. **Silva Lusitana**, v.22, n.1, p.43-66, 2014.
- CHASSOT, T. **Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na Floresta Ombrófila Mista**. 48 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.
- CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGUI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista. **Revista Ciência Florestal**, v.21, n.2, 2011, p.303-313. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098>
- CHOI, J.; LORIMER, C. G.; VANDERWERKER, J.; COLE, W. G.; MARTIN, G. L. A crown model for simulating long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.152, n.1-3, p.235-258, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00606-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00606-X)
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: A quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.
- COOMES, D. A.; ALLEN, R. B. Effects of size, competition and altitude on tree growth. **Journal of Ecology**. v.95, n.5, p.1.084-1.097, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01280.x>
- CUNHA, T. A. **Crescimento de espécies florestais madeiráveis como subsídio para o manejo florestal na Amazônia Ocidental**. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- DIMOV, L. D.; CHAMBERS, J. L.; LOCKHART, B. R. Five-year radial growth of red oaks in mixed bottomland hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.255, n.7, p.2.790-2.800, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.01.070>
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 706p.

EBLING, A. A.; NETTO, S. P. Modelagem de ocorrência de coortes na estrutura diamétrica da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Cerne**, v.21, n.2, p.251-257, 2105. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201521111667>

FERREIRA, W. C.; BOTELHO, S. A.; DAVIDE, A. C.; FARIA, J. M. R. Avaliação do crescimento do estrato arbóreo de área degradada revegetada à margem do Rio Grande, na Usina Hidrelétrica de Camargos, MG. **Revista Árvore**, v.31, n.1, p.177-185, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622007000100020>

FRAVER, S.; D'AMATO, A. W.; BRADFORD, J. B.; JONSSON, B. G.; JÖNSSON, M.; ESSEEN, P. A. Tree growth and competition in an old-growth *Picea abies* forest of boreal Sweden: influence of tree spatial patterning. **Journal of Vegetation Science**, v.25, n.2, p.374-385, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/jvs.12096>

GARCÍA-ABRIL, A.; MARTÍN FERNÁNDEZ, S.; GRANDE, M. A.; MANZANERA, J. A. Stand structure, competition and growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in a Mediterranean mountainous environment. **Annals of Forest Sciences**, v.64, n.8, p.825-830, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/forest:2007069>

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v.25, n.2, p.275-282, 1979.

GOES, F. A. **Modelação do crescimento da árvore individual de *Eucalyptus globulus* Labill.** 66 f. Dissertação (Mestrado em Estatística e Gestão de Informação) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2012.

GUEDES, T. A.; IVANQUI, I. L.; MARTINS, A. B. T. Comparando equações de regressão em dados da saúde. **Acta Scientiarum. Technology**, v.23, n.6, p.1.531-1.535, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v23i0.2794>

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. Porto Alegre: McGraw-Hill Bookman, 5a ed., 2011. 924p.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, J. (Ed.), **Growth Models for Tree and Stand Simulation**. Research Note 30. Royal College of Forestry, Stockholm, Sweden, 1974. p.74–90.

HÄRKÖNEN, S.; MÄKINEN, A.; TOKOLA, T.; RASINMÄKI, J.; KALLIOVIRTA, J. Evaluation of forest growth simulators with permanent sample plot data from Finland. **Forest Ecology and Management**, v.259, n.3, p.573-582, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.015>

HOFFMANN, R.; VIEIRA, S. **Análise de Regressão: uma introdução à Econometria**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1 ed., 1977. 339p.

KIERNAN, D. H.; BEVILACQUA, E.; NYLAND, R. D. Individual-tree diameter growth model for sugar maple trees in uneven-aged northern hardwood stands under selection system. **Forest Ecology and Management**, v.256, n.9, p.1.579-1.586, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.015>

LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.6, n.4, p.343–360, 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90042-7](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(83)90042-7)

MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; SILVA, L. C. R.; FIGURA, M. A.; PEREIRA, E. M.; TÉO, S. J. Comportamento da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* no capão da Engenharia Florestal da UFPR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n.56, p.5-16, 2008.

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos**. 143 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MARTINS, F. B.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; CASTRO, R. V. O. Índices de competição em árvores individuais de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.9, p.1.089-1.098, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2011000900017>

MENDES, B. R.; CALEGARIO, N.; VOLPATO, C. E. S.; MELLO, A. A. Desenvolvimento de modelos de crescimento de árvores individuais fundamentado em equações diferenciais. **Cerne**, v.12, n.3, p.254-263, 2006.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. A basal area increment model for individual trees growing in even and uneven-aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and Management**, v.80, n.1-3, p.57-80, 1996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03638-5](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(95)03638-5)

MUNRO, D. D. Forest growth models – a prognosis. In: FRIES, J. (Ed.). **Growth models for tree and stand simulation**. Royal College of Forestry. Stockholm, 1974. p.1-21.

ORELLANA, H. **Sucessão florestal, regimes de manejo e competição avaliados por modelos de árvore individual em um fragmento de Floresta de Araucária**. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PRETZSCH, H. **Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model**. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 2009. 664p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-88307-4>

PUETTMANN, K. J.; D'AMATO, A. W.; KOHNLE, U.; BAUHUS, J. Individual-tree growth dynamics of mature *Abies alba* during repeated irregular group shelterwood (Femelschlag) cuttings. **Canadian Journal of Forest Research**, v.39, n.12, p.2.437–2.449, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/X09-158>

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, v.50, n.287, p.9-26, 2003.

REYES-MUÑOZ, J. L.; AGUIRRE-CALDERÓN, O. A.; JIMÉNEZ-PÉREZ, J.; TREVIÑO-GARZA, E. J.; JURADO, E.; GONZÁLEZ-LAREDO, R. F. Modelos de predicción del incremento en volumen para bosques mezclados del Estado de Durango, México. **Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v.17, n.1, p.103-113, 2011. DOI: <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.026>

SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M.; RÍO, M. D.; CAÑELLAS, I.; MONTERO, G. Distance independent tree diameter growth model for cork oak stands. **Forest Ecology and Management**, v.225, n.1-2, p.262-270, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.002>

SANTOS, A. T. **Análise do crescimento e simulação de manejo de um plantio de *Ocotea porosa***. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SILVEIRA, B. D.; FLORIANO, E. P.; NAKAJIMA, N. Y.; HOSOKAWA, R. T.; ROSOT, N. C.; GRACIOLI, C. R. Relação da morfometria e competição com o crescimento de *Trichilia clausenii* em um fragmento de floresta Semidecidual, RS. **Revista Floresta**, v.45, n.2, p.373-382, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i2.35164>

SOARES, P.; TOMÉ, M. Distance dependent competition measures for eucalyptus plantations in Portugal. **Annals of Forest Science**, v.56, n.4, p.307-319, 1999. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/forest:19990405>

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137. 1973. 32p.

STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, Vancouver, v.38, n.4, p.890-898, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/X07-192>

TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual tree. **Forest Science**, v.35, n.3, p.816-831, 1989.

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312p.

VIEIRA, G. C. **Prognose do diâmetro e da altura de árvores individuais utilizando inteligência artificial**. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2015.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW, J. A. J.; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Oxford: John Wiley & Sons, 415p. 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119998518>

WEST, P. W. Use of diameter increment and basal area increment in tree growth studies. **Canadian Journal of Forest Research**, v.10, n.1, p.71-77, 1980. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x80-012>

WYKOFF, W. R. A basal area increment model for individual conifers in northern Rocky Mountains. **Forest Science**, v.36, n.4, p.1.077-1.104, 1990.

ZHANG, S.; AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E. Constraining individual tree diameter increment and survival models for loblolly pine plantations. **Forest Science**, v.43, n.3, p.414-423, 1997.

CAPÍTULO V

PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO DE *Pinus taeda* L. COM MODELOS DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar a modelagem do crescimento e da produção para árvores individuais de pinus. Os dados foram provenientes de parcelas permanentes de povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L., localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná. Equações definidas previamente foram empregadas para realizar a modelagem da mortalidade, diâmetro à altura do peito, altura total e volume por hectare, aplicados em uma base de dados diferente daquela usada em seus ajustes. O modelo exponencial foi utilizado para estimar a probabilidade de mortalidade por classe de diâmetro. Para projetar o diâmetro e altura total das árvores individuais, foram utilizados modelos lineares múltiplos, em função de variáveis dendrométricas e do povoamento, assim como do índice de competição. O volume individual foi obtido por meio do modelo de Schumacher e Hall, e o volume por hectare obtido a partir de extrapolações. As estimativas do número de árvores mortas por hectare foram analisadas graficamente com as respectivas observações. Os valores projetados de diâmetro, altura total e volume por hectare foram analisados a partir dos correspondentes valores observados médios, assim como seu desvio padrão. Os resultados indicaram que o modelo exponencial subestimou o número de árvores mortas por hectare, e o início da mortalidade ocorreu tardiamente. Os diâmetros e alturas totais projetadas foram estatisticamente iguais àqueles observados, por meio do teste “t”. Os volumes por hectare também foram estatisticamente iguais aos observados. No entanto, quando foram considerados percentuais de mortalidade irregular, as estimativas de volume apresentaram-se mais próximas aos respectivos valores observados. O modelo apresentado foi o primeiro modelo completo de crescimento e de produção florestal no nível de árvores individuais para *P. taeda* no Brasil, e gerou resultados satisfatórios.

Palavras-chave: Modelo de árvore individual; mortalidade regular e irregular; modelos de projeção; simulador do crescimento florestal.

CHAPTER V

YIELD PREDICTION OF *Pinus taeda* L. BY INDIVIDUAL TREES MODELLING

ABSTRACT

The aim of this study was the modelling of growth and yield for individual pine trees. Data were obtained from permanent plots unthinned stands of *Pinus taeda* L., located in the region of Telemaco Borba, State of Parana, Brazil. Previously defined equations were used to perform the modeling of mortality, diameter at breast height, total height and volume per hectare, applied to a database different from that one for their fits. The exponential model was used to estimate the probability of mortality by diameter class. To predict the diameter and total height of individual trees, multiple linear models were used, using dendrometric and stand variables, as well as the competition index. The individual volume was obtained by the Schumacher and Hall adjusted model, and the volume per hectare obtained from extrapolations. Estimates of the number of dead trees per hectare were graphically analyzed with their respective observations. The predicted values of the diameter, total height and volume per hectare were analyzed from corresponding average values observed, as well as its standard deviation. The results indicated that the exponential model underestimated the number of dead trees per hectare, and its onset was belatedly. The predicted diameter and total heights were statistically equals to those observed using the "t" test. The volumes per hectare were also statistically equal to those observed. However, when irregular mortality percentages were considered, the volume estimates presented closer to their respective observed values. The developed model was the first growth and yield forest complete model at the level of individual trees for *P. taeda* in Brazil, and generated satisfactorily results.

Keywords: Individual-tree model; regular and irregular mortality; prediction models; forest growth simulator.

1 INTRODUÇÃO

As empresas florestais brasileiras buscam suprir a demanda por madeira de diferentes segmentos do setor florestal. As mesmas investem em melhorias em todo processo produtivo, desde a seleção do material genético à colheita, objetivando, principalmente, a manutenção ou aumento da produtividade e uma produção de forma sustentável e contínua.

Independentemente do segmento florestal, quantificar e prognosticar, com confiabilidade, o estoque de seus povoamentos é primordial e de interesse de qualquer administrador florestal. A avaliação do crescimento e da produção é uma condição essencial para definir a utilização dos bens advindos do povoamento, além de fornecer informações que auxiliam a tomada de decisões para a maioria das atividades setoriais.

Uma alternativa eficaz para realizar a modelagem do crescimento e da produção de povoamentos florestais são os modelos de árvores individuais. Nesses modelos, a árvore representa a unidade básica na modelagem (AVERY; BURKHART, 1994) e as estimativas para o povoamento são obtidas pela agregação dos resultados das árvores individuais (PUKKALA, 1987; VANCLAY, 1994). Eles são flexíveis e caracterizam de maneira precisa o crescimento do povoamento sob diversas condições, fornecendo resultados detalhados (WEISKITTEL et al., 2011) como, por exemplo, sobre a estrutura e a dinâmica do povoamento (CLUTTER et al., 1983; ZHANG; AMATEIS; BURKHART, 1997). Nesses modelos, o crescimento por árvore pode ser simulado em função de seus atributos, da área basal, da razão de copa, da qualidade do sítio e por uma medida que expresse a competição entre as árvores, como o índice de competição (ZHANG; AMATEIS; BURKHART, 1997; BURKHART; TOMÉ, 2012).

Os modelos de árvores individuais podem ser subdivididos em modelos dependentes, independentes (MUNRO, 1974) e semi-independentes da distância (STAGE; LEDERMANN, 2008), definidos conforme a medida de competição que incorporam. Nos modelos independentes da distância, a localização das árvores não é especificada (BURKHART; TOMÉ, 2012) e assume-se um padrão espacial médio no povoamento (WEISKITTEL et al., 2011). Tipicamente, para povoamentos homogêneos e equiâneos, esses são constituídos de três submodelos: uma equação de crescimento em diâmetro, outra para o crescimento em altura e um componente de mortalidade (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Os modelos de árvores individuais possuem alto custo para desenvolvê-los, necessitam de dados mais detalhados para a sua utilização e erros provenientes da manipulação dos dados são potencialmente maiores, sobretudo para bases de dados muito grandes (WEISKITTEL et al., 2011), além de serem constituídos por vários submodelos e, em alguns casos, exigirem

variáveis de difícil medição e avaliação, como medidas das copas das árvores (DANIELS BURKHART; CLASON, 1986). A exigência para a aplicação desses modelos está relacionada ao controle mais efetivo no momento das medições e remediações no inventário. Em algumas circunstâncias, a não utilização desses modelos dá-se pelo fato de demandarem cálculos adicionais ou por questões culturais. Entretanto, com a disseminação das técnicas e do conhecimento, atrelada ao avanço de ferramentas computacionais, existem fortes justificativas para empregá-los.

A modelagem de árvores individuais é desenvolvida sobretudo em países europeus e norte-americanos (CHASSOT et al., 2011). No Brasil, grande parte dos trabalhos empregaram apenas os submodelos, ao invés do modelo completo. Dentre esses, destacam-se os trabalhos realizados para algumas espécies nativas amazônicas (SILVA et al., 2002; PHILLIPS et al., 2004); canjerana (*Cabralea canjerana* (Well.) Mart.) (DURLO, 2001); cedro (*Cedrela fissilis* Vellozo) (DURLO et al., 2004); canela preta (*Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez.) (DELLA FLORA et al., 2004); clones de eucalipto (MENDES et al., 2006); eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden) (NUTTO et al., 2006) (MARTINS, 2011); bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) (WEBER, 2007); e araucária (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze.) (CURTO, 2015).

Alguns trabalhos recentes de modelagem do crescimento e produção por meio de modelos de árvores individuais, no Brasil, são os de Salles (2010), Martins (2011) e Castro (2011) para plantios clonais de eucalipto; Castro (2012) para espécies de uma Floresta Estacional Semidecidual; e Orellana (2014) para espécies de uma Floresta Ombrófila Mista. Em geral, para povoamentos de espécies do gênero *Pinus*, especialmente para *P. taeda*, essa modelagem tem se baseado nos modelos de distribuição diamétrica, caracterizados pela utilização de uma função densidade de probabilidade. Como exemplos, tem-se os trabalhos de Gomes, Maestri e Sanquetta (1997), Temps (2005), Eisfield et al. (2005), Elesbão (2008), Ferraz Filho (2009) e Lima (2010). No entanto, até o momento, não foram publicados trabalhos para esse gênero com aplicação do modelo completo de árvores individuais.

Diante disso, o objetivo desse trabalho foi realizar a modelagem do crescimento e da produção por meio de modelos de árvores individuais para povoamentos de *P. taeda*, situados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 INFORMAÇÕES DA ÁREA E DOS DADOS

As características da área, a procedência e as informações dos dados empregados nesta pesquisa e estatísticas descritivas para as principais variáveis dendrométricas e do povoamento estão apresentadas no capítulo I.

As classes de sítio foram definidas no capítulo I, empregando-se o método da curva-guia e o modelo de Chapman-Richards, considerando uma idade índice de 18 anos, cuja equação resultante foi $h_{dom} = 41,224399(1 - e^{-0,061832 I})^{1,156161}$, com erro padrão da estimativa percentual (S_{yx}) igual a 9,5%, em que h_{dom} e I são a altura dominante (m) e idade (anos), respectivamente. Foram consideradas três classes de sítio, sendo a classe I (30,5 m) compreendendo alturas dominantes na idade índice de 28,1 a 33,0 m; a segunda classe (25,5 m) englobando alturas dominantes entre 23,1 a 28,0 m; e a classe III (20,5 m) envolvendo alturas dominantes de 18,0 a 23,0 m, representando as classes de produtividade alta, média e baixa, respectivamente.

Para a estimativa das alturas totais das árvores das parcelas foi utilizado o modelo hipsométrico genérico $h = e^{0,72145+0,02395S-5,90105d^{-1}+0,72669\ln I}$, com S_{yx} igual a 6,7%, ajustado no capítulo I, em que h é a altura total (m), S o índice de sítio (m), d e I como descritos anteriormente.

Ainda no capítulo I, o modelo de Schumacher e Hall (1933) foi utilizado para estimar o volume individual com casca por árvore, ajustado para três classes de idade. Para a classe 1 (4 a 8 anos), a equação foi $v = 0,00008 d^{1,67183} h^{1,05996}$, com S_{yx} de 9,62%. Para a classe 2 (9 a 15 anos), a equação foi $v = 0,00004 d^{1,84164} h^{1,17087}$, com S_{yx} igual a 7,30%. E para a classe 3 (16 a 19 anos), a equação resultante foi $v = 0,00015 d^{1,81772} h^{0,75817}$, obtendo S_{yx} de 6,98%, em que v corresponde ao volume total com casca por árvore (m^3), d e h conforme já definidos.

Os modelos de probabilidade de mortalidade, de projeção do diâmetro e da altura total, assim como o cálculo dos índices de competição, empregados na modelagem, foram ajustados com dados de 1.056 parcelas, medidas nos anos de 2011 a 2014, com 90% dessas possuindo somente duas medições, 10% com três medições e apenas uma medida em quatro anos (2011 a 2014). Para validação dos modelos, foram utilizadas 300 parcelas, selecionadas de maneira a

manter uma distribuição semelhante àquela da base de dados do ajuste, por classes de sítio e idade. O número de parcelas do ajuste e validação, por idade, está apresentado na Tabela 5.1.

TABELA 5.1 - NÚMERO DE PARCELAS PARA O AJUSTE E VALIDAÇÃO DA MODELAGEM DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Dados	Sítio (m)	Idade (anos)																	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ajuste	I	2	37	86	23	13	3	13	15	4	7	12	4	11	3	1	-	1	-
	II	3	37	163	97	65	64	32	58	34	12	41	37	30	8	13	12	3	1
	III	-	9	20	11	19	12	14	4	4	5	9	1	2	-	1	-	-	-
Validação	I	-	6	29	3	3	3	-	4	3	4	1	1	6	-	-	-	-	-
	II	-	10	39	21	19	23	12	14	13	4	18	6	9	5	3	3	1	-
	III	-	1	11	7	3	5	4	2	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-

Nas Tabelas 5.2 estão apresentadas as estatísticas descritivas para as principais variáveis dendrométricas e do povoamento, para as parcelas selecionadas para a validação dos modelos. Os valores de diâmetro à altura do peito, altura total, área basal e número de árvores por hectare estão organizados conforme as classes de sítio e idade.

Com o intuito de realizar a projeção do diâmetro, altura total e volume por hectare, foram selecionadas as 79 parcelas da classe de idade de 5 anos da base de dados para validação (TABELA 5.1). A partir dessas parcelas, a prognose foi realizada até a idade de 18 anos para as classes de sítio I e II, e até os 16 anos para a classe III, uma vez que essa não continha dados acima dessa idade. Com isso, foram projetadas as 29, 39 e 11 parcelas, nas classes de sítio I, II e III, respectivamente.

O cálculo da probabilidade de mortalidade, assim como das projeções do diâmetro, altura total e volume começaram na idade de 5 anos, sendo projetadas anualmente. Os resultados das projeções, por sua vez, foram considerados como os valores atuais e realizada a projeção para mais um período, e assim sucessivamente, até as idades finais de projeção, mencionadas anteriormente.

TABELA 5.2 - ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS PARA OS DADOS SELECIONADOS PARA A VALIDAÇÃO DOS MODELOS, POR CLASSE DE SÍTIO E IDADE, PARA AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E DO POVOAMENTO DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Sítio (m)	Idade (anos)	d (cm)				h (m)				N (ha)				G (m ² .ha ⁻¹)			
		Min	Med	Max	CV%	Min	Med	Max	CV%	Min	Med	Max	CV%	Min	Med	Max	CV%
I (30,5 m)	6	2,0	16,6	29,1	21,2	0,8	10,6	15,0	11,6	954	1.505	1.773	10,4	26,4	34,0	42,1	12,1
	8	2,2	18,5	31,4	25,0	1,8	13,1	18,4	13,0	1.054	1.444	1.619	11,2	32,1	41,4	50,9	14,2
	10	7,3	20,8	32,5	23,3	10,0	16,3	20,4	9,5	1.347	1.443	1.533	5,3	46,3	51,8	56,9	8,2
	12	6,4	22,4	38,8	22,6	7,9	19,8	24,9	9,5	773	1.335	1.583	19,6	43,8	54,3	63,3	13,7
	14	9,5	24,4	40,9	20,0	14,6	21,7	25,3	6,7	733	1.144	1.429	25,7	47,7	53,7	59,7	9,3
	16	10,8	24,5	36,3	19,1	6,8	23,7	28,2	7,8	1.221	1.327	1.413	6,8	60,5	65,0	72,3	7,1
	18	15,9	25,7	42,4	17,5	16,5	27,3	30,6	5,7	1.203	1.228	1.253	2,9	64,7	65,9	67,0	2,5
II (25,5 m)	6	1,6	15,7	27,4	22,5	0,3	9,4	12,8	12,7	1.026	1.421	1.790	12,2	15,1	29,2	39,2	19,5
	8	2,9	18,3	33,8	23,1	2,2	12,3	17,5	11,3	960	1.353	1.687	11,7	24,4	37,7	54,5	14,6
	10	2,9	20,0	39,6	23,9	2,8	14,9	20,2	11,6	896	1.378	1.617	12,8	32,1	45,4	53,5	11,6
	12	4,1	20,9	37,3	23,2	5,2	17,2	22,6	10,8	987	1.325	1.580	12,8	36,3	47,9	58,9	13,8
	14	5,1	21,9	35,3	21,2	6,5	19,7	24,9	9,2	1.138	1.313	1.440	9,0	39,2	51,8	66,7	16,2
	16	8,0	23,7	40,7	19,8	4,4	22,2	28,0	8,3	1.000	1.292	1.439	9,6	45,4	59,4	71,1	12,1
	18	10,2	24,9	38,8	18,1	5,7	24,2	28,9	7,6	1.092	1.286	1.397	8,0	56,0	64,6	71,9	9,1
III (20,5 m)	20	13,0	26,4	38,5	19,5	5,7	26,4	29,7	7,4	1.179	1.222	1.264	4,9	68,6	69,7	70,9	4,7
	6	1,0	14,7	25,8	22,7	0,0	8,3	11,4	13,7	1.037	1.420	1.617	15,7	15,1	25,6	35,4	24,1
	8	4,1	17,2	29,3	22,3	3,8	10,5	13,2	11,6	1.136	1.282	1.441	9,6	25,4	31,2	38,2	14,0
	10	4,1	18,3	33,1	22,3	4,5	13,0	15,9	12,3	1.210	1.371	1.574	8,8	32,8	37,7	46,5	13,3
	12	8,6	19,7	31,8	21,4	7,8	15,4	18,0	9,1	1.273	1.423	1.574	15,0	39,6	45,1	50,5	17,1
	14	8,9	22,7	35,7	19,6	6,8	17,3	19,8	9,6	1.194	1.247	1.287	3,9	47,0	52,9	56,9	9,8
	16	10,0	19,4	28,1	20,4	14,7	19,3	21,3	7,1	1.480	1.480	1.480	-	45,7	45,7	45,7	-

Em que: d = diâmetro à altura do peito; h = altura total; N = número de árvores por hectare; G = área basal; CV% = coeficiente de variação; Min, Med e Max = valores mínimos, médios e máximos, respectivamente.

As projeções foram realizadas baseando-se nos processos descritos no fluxograma apresentado na Figura 5.1. Primeiramente, foram calculados os índices de competição para cada árvore. Em seguida, foi calculada a probabilidade de mortalidade por classe diamétrica. Para essa função, o índice foi obtido para cada classe diamétrica. Nesse trabalho, foi empregada a média aritmética dos índices de competição das árvores integrantes da classe, muito embora poderia ser obtido empregando-se o centro de cada classe, uma vez que proporcionaram valores de índices iguais ou muito próximos, verificado em testes preliminares.

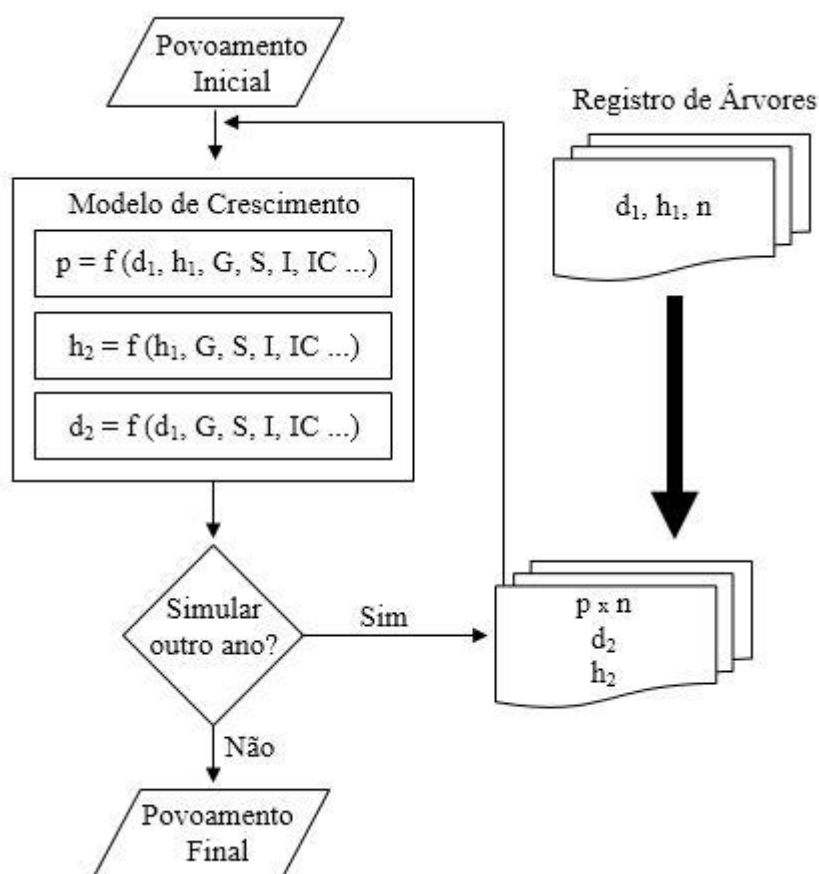


FIGURA 5.1 - FLUXOGRAMA DOS PRINCIPAIS PROCESSOS EMPREGADOS NA MODELAGEM DE ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ. EM QUE: p = PROBABILIDADE DE MORTALIDADE; d_1 E d_2 = DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO NA IDADE ATUAL E DE PROJEÇÃO (cm), RESPECTIVAMENTE; h_1 E h_2 = ALTURA TOTAL NA IDADE ATUAL E DE PROJEÇÃO (m), RESPECTIVAMENTE; G = ÁREA BASAL ($m^2 \cdot ha^{-1}$); S = ÍNDICE DE SÍTIO (m); I = IDADE DE PROJEÇÃO (anos); IC = ÍNDICE DE COMPETIÇÃO; E n = NÚMERO DE ÁRVORES ($N \cdot ha^{-1}$)
FONTE: Adaptado de WEISKITTEL et al. (2011).

Para as árvores sobreviventes, os diâmetros e alturas totais foram projetados para o próximo período.

2.2 ESTIMATIVA DA MORTALIDADE

Para obter o número de árvores mortas por hectare, foi estimada a probabilidade de mortalidade anual por classe diamétrica (P_m) por meio do modelo exponencial, selecionado no capítulo III. A amplitude de classe utilizada foi de 2 cm. O produto dessa probabilidade e o número de árvores por hectare da classe diamétrica forneceu o número de árvores a serem removidas, as quais foram escolhidas aleatoriamente, dentro da respectiva classe diamétrica. O modelo exponencial utilizou como variável independente o índice de competição IC.1 (*Basal Area Index* – BAI) (STAGE, 1973), dado pela expressão $d_i^2 \cdot q^{-2}$, em que d_i é o diâmetro à altura do peito da árvore-objeto (cm) e q é o diâmetro quadrático das árvores da unidade amostral (cm).

Além do índice de competição, outras variáveis independentes utilizadas foram o centro da classe de diâmetro, em cm (CC_d), a idade, em anos (I), a área basal da classe diamétrica, em $m^2 \cdot ha^{-1} \cdot classe$ (G_{classe}) e o índice de sítio, em m (S). A equação resultante foi dada pela expressão $P_m = -0,0028 + e^{(-5,8078 - 2,0264BAI + 0,0853CC_d + 0,1834I - 0,8913G_{classe} + 0,0377S)}$. Essa equação foi aplicada às parcelas a partir dos cinco anos de idade, até a classe diamétrica de 28 cm e até a o diâmetro correspondente a 75% do diâmetro médio da parcela, conforme definições no capítulo III. Por meio de análise gráfica, o número de árvores mortas por hectare estimado foi comparado ao respectivo valor observado.

2.3 PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL

A projeção dos diâmetros à altura do peito e da altura total de cada árvore foi realizada pelas equações desenvolvidas no capítulo IV. O diâmetro foi projetado em função dele próprio na idade atual, em cm (d_1), da idade de projeção, em anos (I_2), do índice de sítio, em m (S) e da área basal, em $m^2 \cdot ha^{-1}$ (G). O índice de competição foi dado pela expressão $(d_i \cdot \bar{d}^{-1})^2$ (GLOVER; HOOL, 1979), em que \bar{d} é o diâmetro médio aritmético das árvores da unidade amostral (cm) e d_i como já definido. A equação foi dada por $d_2 = -1,0818 + 0,9299 d_1 + 0,1225 I_2 + 0,0967 S - 0,0578 G + 1,7812 IC.3$, com S_{yx} de 5,5%.

Para a altura total, foi empregado um modelo com mesma formulação matemática semelhante àquele para o diâmetro, cuja equação foi dada pela seguinte expressão $h_2 = 1,1139 + 0,3231 h_1 + 0,6614I_2 + 0,1468 S + 0,0517 G - 0,0322 IC.6$, com S_{yx} igual a

5,98%. As variáveis h_1 e h_2 representam a altura total na idade atual e de projeção (m), respectivamente, e as demais como definidas anteriormente. O índice de competição utilizado foi o de Lorimer (1983) (IC.6), dado pela expressão $\sum d_j \cdot d_i^{-1}$, em que d_j representa o diâmetro à altura do peito das árvores competidoras (cm) e d_i como já definido.

2.4 ESTIMATIVA DO VOLUME

Obtidos os diâmetros e alturas totais para as árvores sobreviventes, em todas as idades, as equações volumétricas foram aplicadas para estimar os volumes individuais para cada uma. O volume da parcela foi obtido ao somar os volumes individuais das árvores da mesma e, por meio de extrapolações, obtido o volume por hectare.

2.5 AVALIAÇÃO DAS PROJEÇÕES

Conforme mencionado, grande parte das parcelas empregadas neste trabalho foram medidas apenas em duas ocasiões e, com isso, impossibilitou a comparação dos valores projetados com os seus valores observados, ao realizar a projeção a partir de idades iniciais até aquelas idades mais avançadas. Diante dessa situação, os valores médios projetados de diâmetro, altura total e volume por hectare foram comparados graficamente com os respectivos valores médios observados, por classe de sítio e por idade. Ainda, foi verificada a localização dos valores projetados dentro do intervalo de mais ou menos um desvio padrão das respectivas variáveis observadas.

Para verificar a igualdade estatística entre os valores projetados com os respectivos valores observados, foi realizado o teste “t”, a 5% de significância, cuja categoria foi definida conforme a análise das variâncias por meio do teste “F”. A hipótese de nulidade (H_0) do teste presume que os valores observados e projetados são estatisticamente iguais, ao passo que a hipótese alternativa (H_a) prevê diferenças entre elas (teste bilateral). A fórmula para esse teste é dada pela expressão $t = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \left(s \sqrt{n_1^{-1} + n_2^{-1}} \right)^{-1}$ (SPIEGEL, 1976), em que “t” é o valor da estatística, calculada considerando “2n - 2” graus de liberdade, \bar{x}_1 e \bar{x}_2 representam as médias observadas e projetadas, respectivamente, “s” refere-se ao desvio padrão, e “n₁” e “n₂” o número de dados observados e projetados, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTIMATIVA DA MORTALIDADE

O número de árvores mortas por hectare observado e estimado está apresentado na Figura 5.2. Para todas as classes de sítio, houve tendência de subestimação da mortalidade nas idades iniciais, uma vez que o modelo exponencial não foi capaz de estimar o número de árvores mortas nas idades iniciais, sendo verificado somente a partir da idade de 13, 14 e 15 anos, para as classes de sítio I, II e III, respectivamente. Nas idades mais avançadas, o modelo superestimou o número de mortas, em todas as classes de sítio. Conforme Eid e Tuhus (2001), o maior desafio dos modelos de mortalidade está em estimar satisfatoriamente a probabilidade, sobretudo nos estágios iniciais e finais de crescimento.

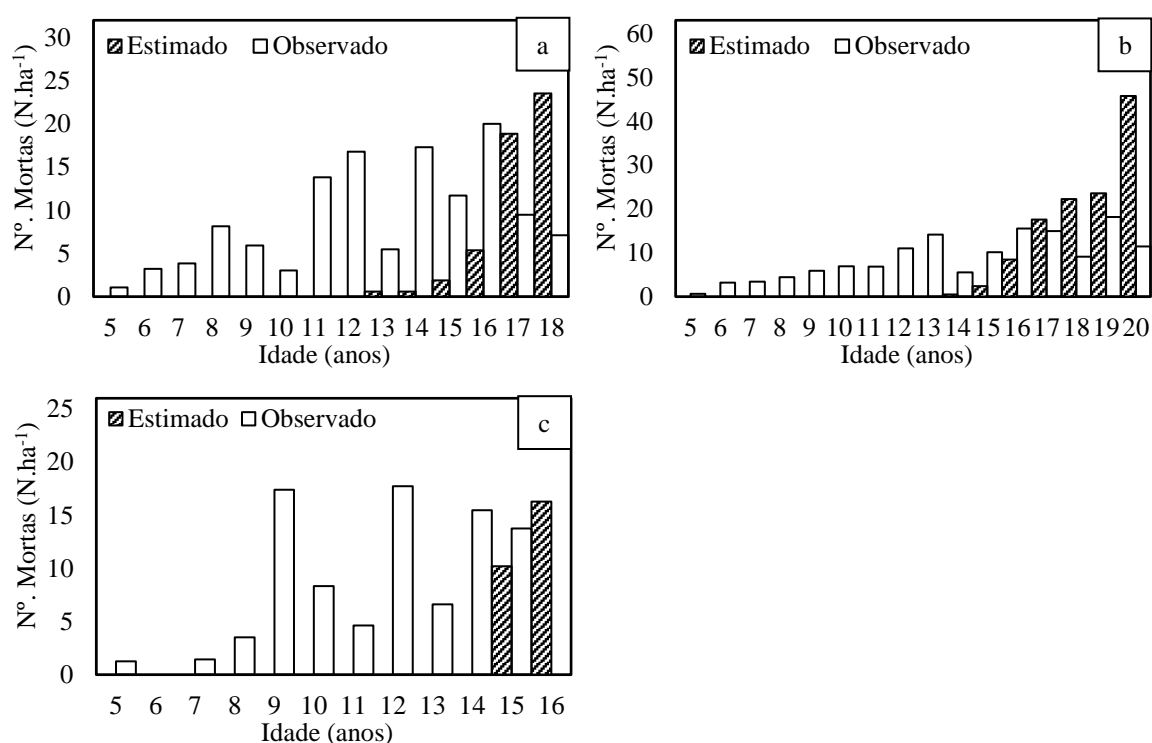


FIGURA 5.2 - NÚMERO DE ÁRVORES MORTAS POR HECTARE OBSERVADO E ESTIMADO, PARA AS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), RESPECTIVAMENTE, PARA POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

A baixa precisão das estimativas está atrelada ao fato de existirem excesso de valores “zero” nas observações, uma vez que houve mais casos de não mortalidade à existência de mortalidade, como mencionado no capítulo III. De acordo com Zhao et al. (2007), muitas vezes, os dados contêm grande proporção de observações sem ocorrência de mortalidade,

mesmo ao longo de um período de vários anos. No entanto, como informado no referido capítulo, a mortalidade regular foi responsável por um percentual muito baixo, nas diferentes classes de sítio e, com isso, não afetou a modelagem.

Modelos de probabilidade de mortalidade apresentam baixa performance devido a mortalidade representar um evento aleatório, de difícil mensuração e estimação (HAMILTON, 1990; MONSERUD; STERBA, 1999; YANG; TITUS; HUANG, 2003).

Esses resultados explicam o porquê de alguns trabalhos desprezarem a mortalidade regular em povoamentos bem manejados. Como exemplo, Salles (2010) modelou o crescimento e a produção para eucaliptos clonais de 20 a 95 meses de idade, provenientes de um sistema agroflorestal, situado no município de Paracatu, região noroeste do estado de Minas Gerais. O modelo de árvores individual independente da distância foi composto pelos submodelos para projeção do diâmetro e altura, e outro para estimar o volume, porém, não foi realizada a modelagem da mortalidade.

Novaes (2009) estudou o crescimento e produção para povoamentos de *Tectona grandis* L. f. Como o povoamento foi desbastado e os dados provenientes de análise de tronco, o autor considerou sobrevivência 100%, sob a pressuposição de que a mortalidade regular foi antecipada pela aplicação do desbaste.

3.2 PROJEÇÃO DO DIÂMETRO E ALTURA TOTAL

Devido às características das parcelas, os valores projetados de diâmetro e altura total foram avaliados pelos respectivos valores médios e desvio padrão. Na Figura 5.3 está apresentada a tendência de crescimento em diâmetro para as três classes de sítio, assim como os valores observados e desvios padrões. As projeções do diâmetro se apresentaram inseridas no intervalo entre mais e menos um desvio padrão, para todas as classes de sítio e idade. No geral, houve tendência de superestimação nas menores idades, após 7 anos, e subestimação dos diâmetros em idades mais avançadas, sobretudo para o sítio III. Tendência similar a observada por Härkönen et al. (2010) para *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* e *Betula pubescens*, a partir de dados do Inventário Florestal Nacional da Finlândia, coletados em sua região Sul. Martins (2011) também encontrou comportamento semelhante para plantios clonais híbridos de eucaliptos em Monte Dourado, Pará.

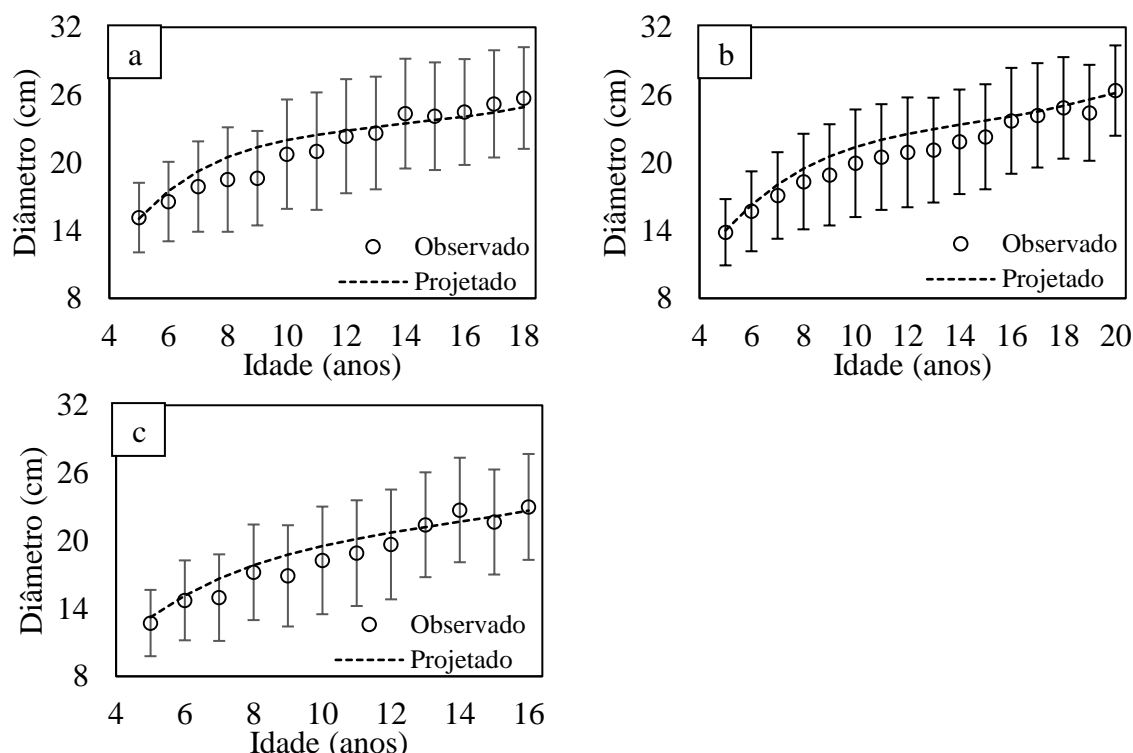


FIGURA 5.3 - DIÂMETROS OBSERVADOS E PROJETADOS EM DIFERENTES IDADES PARA AS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Em todas as situações avaliadas, o diâmetro projetado coincidiu com o observado na idade de 5 anos, uma vez que representou o ponto inicial das projeções. A partir daí, houve pequena superestimação dessa variável, até os 12 anos para as classes de sítio I e III, e até os 15 anos para o sítio II. Isso também foi resultado da variação dos próprios valores observados de diâmetro, decorrente de poucas medições das parcelas ao longo do tempo. Contudo, as projeções se apresentaram próximas aos respectivos valores observados.

Após realização do teste “F”, foi realizado o teste “t” considerando variâncias homogêneas. Conforme o teste “t”, os valores projetados e os observados foram estatisticamente iguais, a 5% de significância. Os valores calculados dessa estatística foram de -0,45, -0,80 e -0,50, com os valores tabelados de 2,06 (p-valor = 0,66), 2,04 (p-valor = 0,43) e 2,07 (p-valor = 0,63), para as classes de sítio I, II e III, respectivamente. Assim, a hipótese de nulidade não foi rejeitada no nível de significância considerado. Valores positivos e negativos dessa estatística indicam que, em média, os valores projetados foram subestimados e superestimados, respectivamente, sendo a magnitude observada pelo valor absoluto.

O comportamento das alturas totais projetadas em relação aos respectivos valores observados está apresentado na Figura 5.4. Menores desvios padrões foram observadas em relação àqueles obtidos para o diâmetro. Para a classe de sítio I, os valores projetados foram

sutilmente superestimados nas idades de 8 e 9 anos, assim como subestimados a partir dos 14 anos, porém, com valores pouco distantes da média observada. Por outro lado, as alturas totais foram superestimadas para o sítio II a partir da idade de 8 anos. Todavia, as projeções se apresentaram dentro dos limites estabelecidos pelo desvio padrão.

Tendência similar àquela observada por Soares e Tomé (2002) para plantações de eucalipto, em Portugal que, além das classes superiores, verificaram superestimação nas classes inferiores de altura. Martins (2011) também encontrou mesma tendência, para plantios clonais de eucaliptos, localizados em Monte Dourado, Pará.

Finalmente, as projeções de alturas totais para a classe de sítio III foram visualmente semelhantes às observações, para quase todas as idades, com exceção dos 7, 15 e 16 anos, mas com grande proximidade aos valores observados.

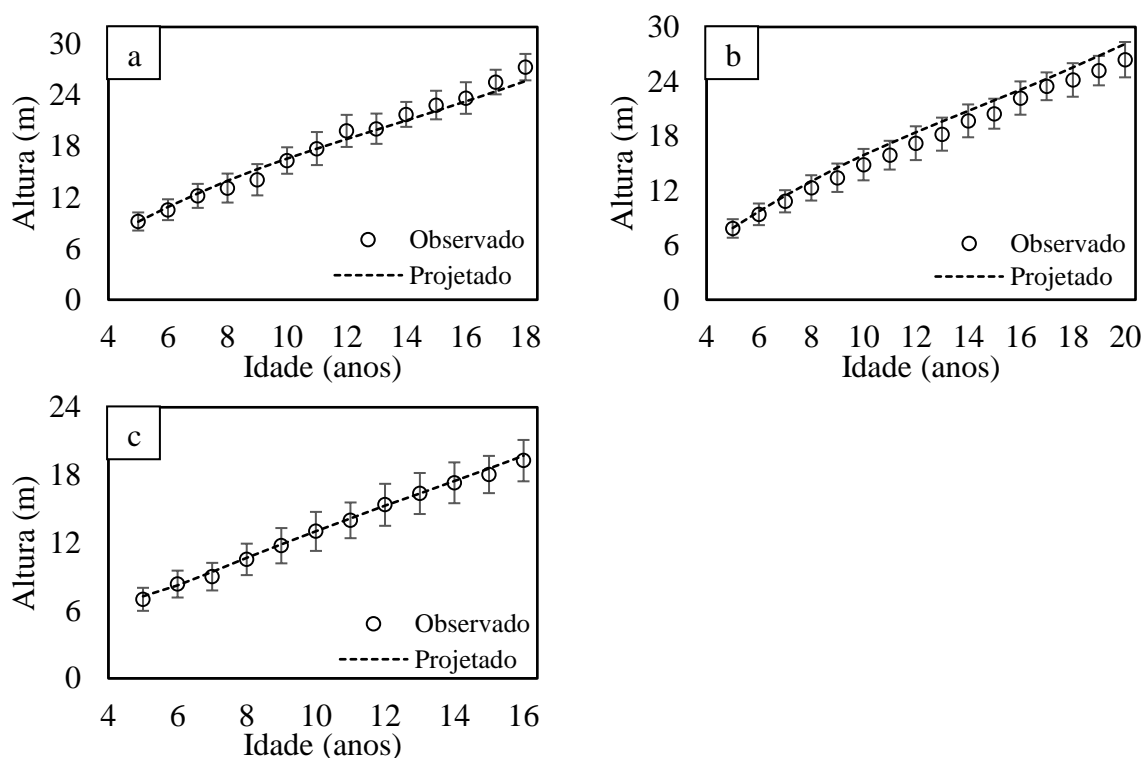


FIGURA 5.4 - ALTURAS TOTAIS OBSERVADAS E PROJETADAS EM DIFERENTES IDADES PARA AS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

Após realização do teste “F”, foi realizado o teste “t” considerando variâncias homogêneas. De acordo com o teste “t”, a hipótese de nulidade não foi rejeitada e, com isso, os valores projetados e observados foram considerados iguais. Os valores dessa estatística foram de 0,10, -0,49 e -0,10, com os valores tabelados de 2,06 (p-valor = 0,92), 2,04 (p-valor = 0,63) e 2,07 (p-valor = 0,92), para as classes de sítio I, II e III, respectivamente.

3.3 ESTIMATIVA DO VOLUME

Obtidos os diâmetros e alturas totais para as árvores sobreviventes, em todas as idades, as equações volumétricas foram aplicadas para estimar os volumes individuais para cada uma. Na Figura 5.5 está apresentada a tendência do crescimento em volume por hectare observada e estimada, para as três classes de sítio. Os desvios padrões aumentaram com o avanço da idade, sendo uma tendência semelhante àquela obtida por Castro et al. (2013), para povoamentos clonais não desbastados de eucaliptos, na região de Monte Dourado, Pará.

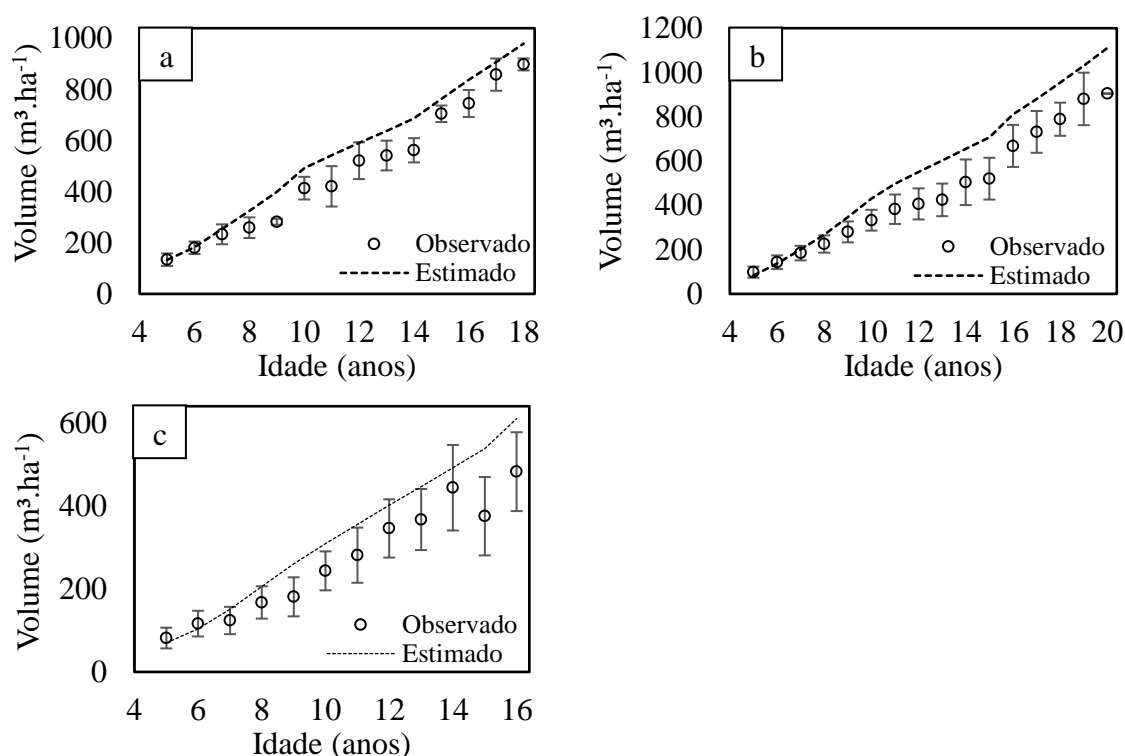


FIGURA 5.5 - VOLUMES OBSERVADOS E ESTIMADOS EM DIFERENTES IDADES E NAS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, ESTADO DO PARANÁ

Em todas essas classes, os valores estimados se aproximaram daqueles observados somente nas idades iniciais, em torno de 7 anos e, desse ponto em diante, os valores se situaram acima das médias observadas, até mesmo acima do limite superior do desvio padrão.

Após realização do teste “F”, foi realizado o teste “t” considerando variâncias homogêneas. O teste “t” foi realizado e os resultados indicaram que não houve diferenças entre os volumes observados e estimados. Os resultados dessa estatística foram de -0,71, -1,08 e -0,96, com os valores críticos de 2,06 (p-valor = 0,48), 2,04 (p-valor = 0,29) e 2,07 (p-valor = 0,35), para as classes de sítio I, II e III, respectivamente.

Embora, estatisticamente, ocorreu igualdade entre os valores observados e estimados de volume por hectare, as estimativas apresentaram-se superiores, o que pode provocar erros expressivos ao considerar toda a área plantada, sobretudo no planejamento do povoamento. A diferença entre as estimativas de volume e os respectivos valores observados foram de, em média, 15, 21 e 20%, para os sítios I, II e III, respectivamente.

A diferença entre os valores observados e estimados de volume por hectare era esperada uma vez que as projeções foram realizadas considerando apenas a mortalidade regular, sendo desconsideradas todas as causas de mortalidade associadas aos fatores catastróficos. Conforme visto no capítulo III, a principal causa da mortalidade no povoamento do presente estudo se refere à mortalidade irregular, sobretudo aquela provocada por ataque de macaco-prego (*Sapajus nigritus*, Goldfuss, 1809).

Conforme observado no capítulo III, o percentual médio de árvores mortas pelo macaco-prego, causada pelos ventos e caídas por problemas de raiz ou outro motivo que não seja o macaco atingiu 18, 21 e 20%, para as classes de sítio I, II e III, respectivamente. Esses percentuais foram próximos àqueles obtidos na comparação dos valores observados e estimados de volume por hectare, conforme mencionado anteriormente.

Diante disso, esses percentuais médios de mortalidade irregular (18, 21 e 20%) foram descontados do número de árvores de cada parcela e, conseqüentemente, por hectare, de maneira a proporcionar uma produção volumétrica estimada (volume corrigido) mais próxima daquela observada no povoamento, uma vez que considerou tanto a mortalidade regular quanto a irregular. As árvores retiradas foram selecionadas aleatoriamente dentro de cada parcela. Na Figura 5.6 está apresentado o comportamento dos volumes observados e estimados (corrigidos) nas diferentes idades e classes de sítio.

A consideração desses percentuais médios de mortalidade irregular proporcionou visualmente uma melhoria substancial, em que as estimativas de volume se apresentaram bem próximas aos respectivos valores observados, para quase totalidade das idades, nas três classes de sítio. Nas idades de 9 e 15 anos, para os sítios I, a diferença entre os volumes estimados e observados se deu, principalmente, à própria tendência irregular das observações.

Ao recalcular o teste “t”, também para variâncias homogêneas de acordo com o teste “F”, agora para os valores corrigidos de volume, os resultados indicaram a não rejeição da hipótese de nulidade (H_0), assim como antes, porém, com valores inferiores de “t” e superiores de significância (p-valor). Os valores obtidos dessa estatística foram de -0,04, -0,17 e -0,04, com os valores críticos de 2,06 (p-valor = 0,96), 2,04 (p-valor = 0,87) e 2,07 (p-valor = 0,97), para os sítios I, II e III, respectivamente.

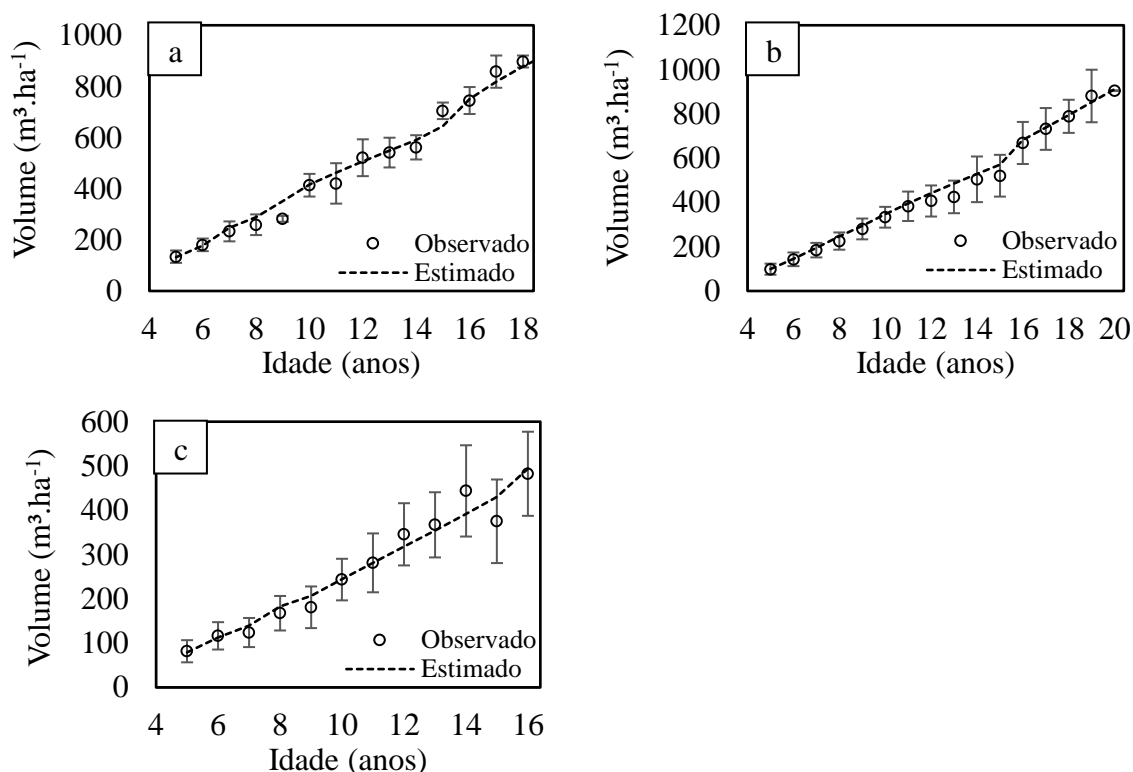


FIGURA 5.6 - VOLUMES OBSERVADOS E ESTIMADOS (CORRIGIDOS) EM DIFERENTES IDADES E NAS CLASSES DE SÍTIO I (30,5 m) (a), II (25,5 m) (b) E III (20,5 m) (c), EM POVOAMENTOS DE *P. taeda* SITUADOS NA REGIÃO DE TELÊMACO BORBA, PARANÁ

O modelo apresentado foi o primeiro modelo completo de crescimento e de produção florestal no nível de árvores individuais para *P. taeda* no Brasil, e gerou resultados satisfatórios. O modelo foi constituído de equações para determinar as classes de sítio, equações para estimar a altura total e o volume individual com casca. Além disso, fizeram parte a função exponencial para estimativas da probabilidade de mortalidade por classe diamétrica e modelos lineares múltiplos para a projeção do diâmetro e da altura total.

Outros trabalhos em que foram propostos modelos completos para realizar a modelagem do crescimento e da produção no nível de árvores individuais foram os de Alegria (2004) para povoamentos de pinheiro bravo (*P. pinaster* Aiton) em Portugal, a qual empregou submodelos de crescimento anual em diâmetro com casca, altura total e altura dominante, sítio, idade, proporção média da copa, sobrevivência, volume total e comercial por árvore. Salles (2010) propôs um modelo de crescimento e produção para clones de eucaliptos, plantados no noroeste de Minas Gerais, composto pelos submodelos para projeção do diâmetro e altura, e outro para estimar o volume, não sendo modelada a mortalidade.

Martins (2011) sugeriu o modelo de crescimento e produção de plantios comerciais de clones de eucalipto não desbastados localizados em Monte Dourado, Pará. Os submodelos

empregados foram aqueles para estimar o diâmetro e altura, e probabilidade de mortalidade por classe diamétrica. Castro (2011) propôs um modelo similar ao anterior, no entanto, as estimativas foram obtidas ainda por meio de redes neurais artificiais.

Vários outros modelos que simulam a dinâmica do crescimento e produção florestal foram propostos, para diferentes regiões do mundo e espécies. A listagem de alguns pode ser vista em Härkönen et al. (2010), Martins (2011) e Henderson et al. (2013).

4 CONCLUSÕES

O modelo de árvores individuais propiciou projeções precisas e estatisticamente iguais aos valores observados de diâmetro à altura do peito e altura total, para as três classes de sítio, em povoamentos de *P. taeda* localizados na região de Telêmaco Borba, estado do Paraná.

Para o volume por hectare, estatisticamente os valores observados e projetados foram iguais. No entanto, quando se considerou percentuais de árvores mortas associados à mortalidade irregular, as estimativas se apresentaram mais próximas aos respectivos valores observados, havendo, portanto, maior acuracidade das estimativas.

O modelo apresentado foi o primeiro modelo completo de crescimento e de produção no nível de árvores individuais para *P. taeda* no Brasil, e gerou resultados satisfatórios.

REFERÊNCIAS

- ALEGRIA, C. M. M. **Estudo da dinâmica do crescimento e produção dos povoamentos naturais de pinheiro bravo na região de Castelo Branco**. 534 f. Tese (Doutorado), Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 2004.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. 4. ed., New York: McGraw-Hill Book, 1994. 408p.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. New York: Springer, 2012. 457p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9>
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem de árvore individual para uma floresta estacional Semidecidual utilizando redes neurais**. 105 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.
- CASTRO, R. V. O. **Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.3, p.287-295, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2013000300007>
- CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGUI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista. **Revista Ciência Florestal**, v.21, n.2, 2011, p.303-313. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/19805098>
- CLUTTER, J. L.; FORTSON, J. C.; PIENAAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: A quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.
- CURTO, R. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian Journal Forest Research**, Vancouver, v.16, p. 1.230-1.237, 1986. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x86-218>
- EID, T.; TUHUS, E. Models for individual tree mortality in Norway. **Forest Ecology and Management**, v.154, n.1-2, p.69-84, 2001. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00634-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00634-4)
- EISFELD, R. L.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. E.; MELLO, A. A. Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. por meio do processo de difusão. **Cerne**, v.11, n.2, p.167-177, 2005.

ELESBÃO, L. E. G. **Crescimento e produção de *Pinus taeda* L. na região dos Campos de Cima da Serra, Rio Grande do Sul.** 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

FERRAZ FILHO, A. C. **Sistema de prognose do crescimento e produção para *Pinus taeda* L. sujeito a regimes de desbastes e podas.** 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. **Forest Science**, v.25, n.2, p.275-282, 1979.

GOMES, F. S.; MAESTRI, R.; SANQUETTA, C. R. Avaliação da produção em volume total e sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* L. submetidos a diferentes condições de espaçamento inicial e sítio. **Revista Ciência Florestal**, v.7, n.1, p.101-126, 1997.

HAMILTON JR., D. A. Extending the range of applicability of an individual tree mortality model. **Canadian Journal of Forest Research**, v.20, n.8, p.1.212-1.218, 1990. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/x90-160>

HÄRKÖNEN, S.; MÄKINEN, A.; TOKOLA, T.; RASINMÄKI, J.; KALLIOVIRTA, J. Evaluation of forest growth simulators with permanent sample plot data from Finland. **Forest Ecology and Management**, v.259, n.3, p.573-582, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.015>

HENDERSON, J. E.; ROBERTS, S. D.; GREBNER, D. L.; MUNN, I. A. A graphical comparison of loblolly pine growth-and-yield models. **Southern Journal of Applied Forestry**, v.37, n.3, p.169-176, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5849/sjaf.10-013>

LIMA, R. **Crescimento de *Pinus taeda* L. em diferentes espaçamentos.** 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2010.

LORIMER, C. G. Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands. **Forest Ecology and Management**, v.6, n.4, p.343-360. 1983. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(83\)90042-7](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(83)90042-7)

MARTINS, F. B. **Modelagem de crescimento em nível de árvore individual para plantios comerciais de eucaliptos.** 143 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

MONSERUD, R. A.; STERBA, H. Modelling individual tree mortality for Austrian forest species. **Forest Ecology and Management**, v.113, n.2-3, p.109-123, 1999. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00419-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00419-8)

MUNRO, D. D. Forest growth models – a prognosis. In: FRIES, J. (Ed.). **Growth models for tree and stand simulation.** Royal College of Forestry. Stockholm, 1974. p.1-21.

NOVAES, D. M. **Modelagem de crescimento e produção de povoamentos de *Tectona grandis* L.f. a partir de análise de tronco.** 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

ORELLANA, H. **Sucessão florestal, regimes de manejo e competição avaliados por modelos de árvore individual em um fragmento de Floresta de Araucária**. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PUKKALA, T. Simulation model for natural regeneration of *Pinus sylvestris*, *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens*. **Silva Fennica**, v.21, n.1, p. 37-53, 1987. DOI: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.a15462>

SALLES, T. T. **Modelagem de crescimento e produção de clones de eucalipto em um sistema agroflorestal**. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SOARES, P.; TOMÉ, M. Height-diameter equation for first rotation eucalypt plantations in Portugal. **Forest Ecology and Management**, v.166, n.1-3, p.99-109, 2002. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00674-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00674-0)

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976. 580p.

STAGE, A. R. **Prognosis model for stand development**. USDA Forest Service: Research Paper INT-137. 1973. 32p.

STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, Vancouver, v.38, n.4, p.890-898, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1139/X07-192>

TEMPS, M. **Adição da precipitação pluviométrica na modelagem do crescimento e da produção florestal em povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

YANG, Y.; TITUS, S. J.; HUANG, S. Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. **Ecological Modelling**, v.163, n.3, p.209-222, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00008-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00008-5)

VANCLAY, J. K. **Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forest**. Wallingford: CAB International, 1994. 312p.

WEBER, K. S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW, J. A. J.; VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling**. Oxford: John Wiley & Sons, 2011. 415p. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9781119998518>

ZHANG, S.; AMATEIS, R. L.; BURKHART, H. E. Constraining individual tree diameter increment and survival models for loblolly pine plantations. **Forest Science**, v.43, n.3, p.414-423, 1997.

ZHAO D.; BORDERS, B.; WANG, M.; KANE, M. Modeling mortality of second-rotation loblolly pine plantations in the Piedmont/Upper Coastal Plain and Lower Coastal Plain of the southern United States. **Forest Ecology and Management**. v.252, n.1-3, p.132-143, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.030>

5 CONCLUSÕES GERAIS

Conforme os testes de anamorfismo e do comportamento do coeficiente de variação das alturas dominantes, as curvas de índice de sítio para os povoamentos de *P. taeda* da região de Telêmaco Borba, estado do Paraná, seguiram padrão anamórfico.

Os resultados indicaram que a utilização de modelos de produção em diâmetro e altura total foi preferível àqueles de incremento. Não houve um único índice mais correlacionado com todas as variáveis envolvidas na análise. Porém, para o diâmetro, altura total e probabilidade de mortalidade, os índices mais correlacionados foram os índices de Glover e Hool, Lorimer e Stage, respectivamente.

A mortalidade regular ocorreu a partir dos 5 anos de idade, até a classe de 28 cm e dentro do intervalo compreendido entre o diâmetro mínimo até o equivalente a 75% do diâmetro médio aritmético da parcela, representando, em média, apenas 1% da mortalidade de árvores no povoamento, a qual foi provocada, em grande parte, por fatores associados à mortalidade irregular.

Os modelos de projeção do diâmetro e altura total propiciaram projeções precisas, em função da própria variável na idade atual, assim como da idade de projeção, área basal e do índice de sítio. Os índices de competição com maiores contribuições na projeção do diâmetro e da altura total foram os índices de Glover e Hool e o de Lorimer, respectivamente.

O modelo de árvores individuais propiciou projeções precisas e estatisticamente iguais aos valores médios observados de diâmetro e altura total, em todos os sítios e, para o volume por hectare, as estimativas foram iguais estatisticamente, principalmente quando se considerou a remoção dos percentuais de mortalidade irregular.

O modelo apresentado foi o primeiro modelo completo de crescimento e de produção no nível de árvores individuais para *P. taeda* no Brasil, e gerou resultados satisfatórios.

6 RECOMENDAÇÕES

É recomendável que os dados a serem utilizados em estudos de crescimento e produção compreendam toda a variação existente no povoamento. Isso é essencial para uma maior acuracidade na determinação das curvas de sítio e de todos os modelos empregados na modelagem. Além disso, mesmo sendo possível realizar a modelagem do crescimento e da produção a partir de parcelas sem remedições em todo o período de crescimento, é preferível que as mesmas sejam medidas em todas as idades de crescimento da espécie, sobretudo para modelos de árvores individuais, o que promove melhor acompanhamento da dinâmica do povoamento, tanto para os incrementos quanto para a mortalidade.

Embora não exista comprovação de superioridade de índices dependentes aos independentes da distância, recomenda-se testá-los em povoamentos de *P. taeda*, uma vez que, até o momento, não foram publicados trabalhos com essa finalidade no Brasil.

No presente estudo, a mortalidade regular foi estimada por meio de modelos de probabilidade de mortalidade por classes diamétricas. Assim, recomenda-se a avaliação de modelos cuja variável dependente considere a probabilidade de mortalidade da árvore individual. Do mesmo modo, torna-se interessante o estudo de modelos que consideram tanto a mortalidade regular quanto a irregular.

Os modelos de projeção do diâmetro e altura total utilizados no presente trabalho foram todos lineares. Dessa forma, recomenda-se testar e avaliar modelos não lineares, tanto modelos estatísticos quanto biológicos.

Como o modelo apresentado no presente estudo foi o primeiro modelo completo de árvores individuais para povoamentos de *P. taeda* não desbastados no Brasil, torna-se importante investigar, também, o desempenho desses modelos para povoamentos submetidos a desbaste.